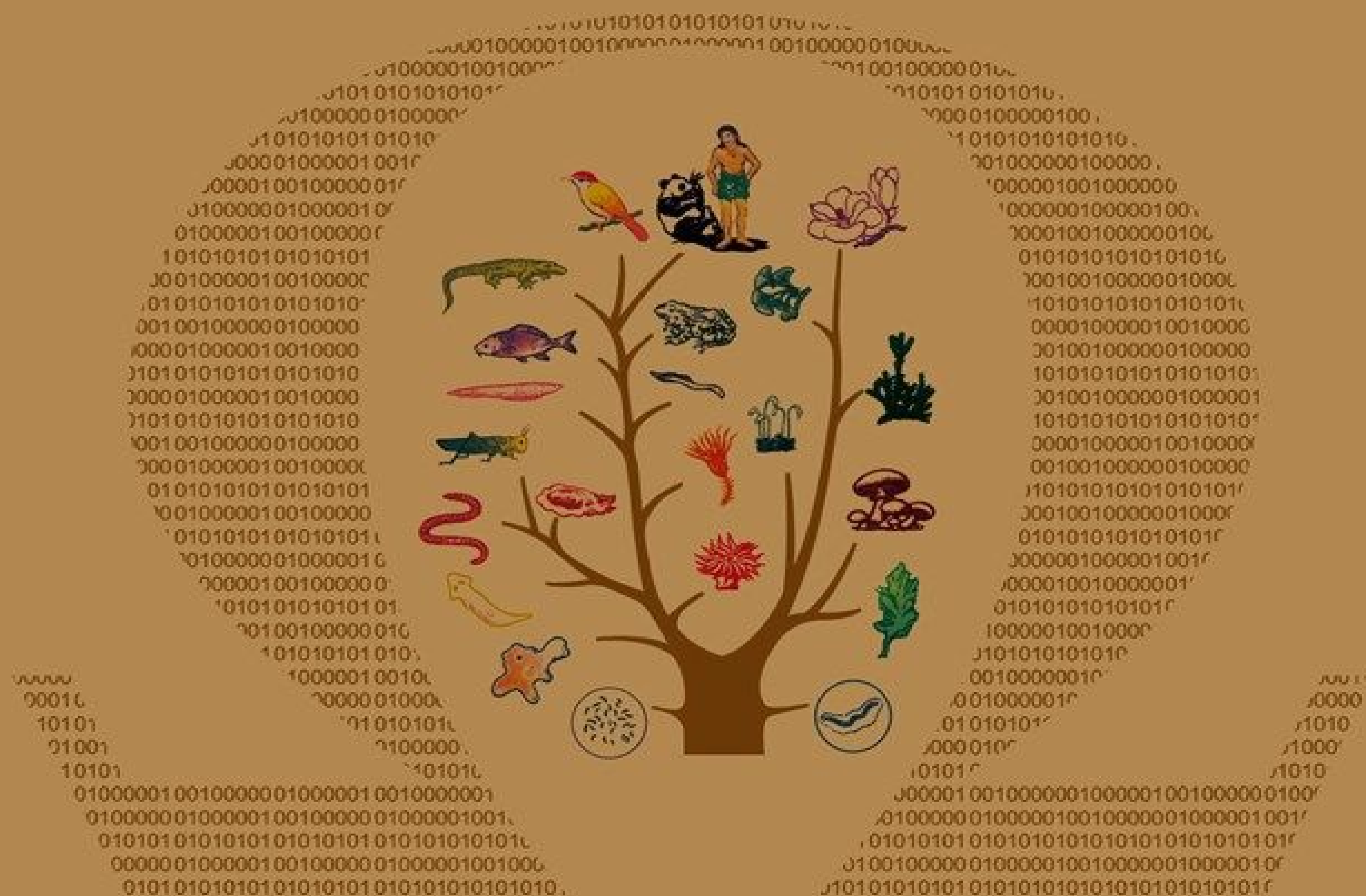
TURING 图灵新知

Proving Darwin: Making Biology Mathematical

证明达尔文

进化和生物创造性的一个数学理论

[美] 格雷戈里·蔡汀/著 陈鹏/译 刘钢/审校



人民邮电出版社
POSTS & TELECOM PRESS

版权信息

书名：证明达尔文：进化和生物创造性的一个数学理论

作者：[美] 格雷戈里·蔡汀

译者：陈鹏

ISBN：978-7-115-37423-3

版权声明

谨献



谨以本书献给

约翰·冯·诺伊曼（**1903—1957**）

一位出类拔萃的数学家

一则寓言

从前，拉比学校的一位年轻学生去听了一位知名拉比的三场讲座。事后他对朋友说："第一场演讲非常棒，我听懂了每句话的意思。第二场更加精彩，深刻而玄妙。有很多地方我都不太明白，但拉比理解其中的一切。第三场演讲是迄今为止最好的，一次伟大而难忘的经历。我没听懂拉比讲的是什么，连拉比自己也都不明白。"

——尼尔斯·玻尔，转引自亚伯拉罕·佩斯的

《尼尔斯·玻尔的时代》

自相矛盾的引文？

高等生命形态按照这种方式［达尔文的进化论］出现的几率，堪比垃圾场的废物旧货在龙卷风的作用下自发组装出一架波音**747**飞机。

——弗雷德·霍伊尔，《智能宇宙》，**1983**年

在我看来，如果达尔文理论如它的信奉者所相信的那样简单、本质和基础，那就应该存在一个同样基本的关于它的数学理论，通过它可以一般、精确且抽象地表达达尔文理论的思想，如同我们在纯数学中习以为常的那样。

——格雷戈里·蔡汀，《关于生物学、信息与复杂性的思考》，

《**EATCS**会刊》，**2007**年**2**月

数学能成功处理的只是一些最简单的情况，或者更确切地说，即便是一个复杂的情况，那也要是机缘巧合使得这个复杂的情况依赖于几个主导的简单因素。一旦偏离了自己轻车熟路的路径，数学就会在一片密布无名的特殊函数以及不可解的组合特殊性的丛林中迷失方向。因此，数学技巧只有在它是从触及某个问题的简单实质（如果这个问题有简单实质的话）的一点出发时才有效。那种与一根筋相对的智慧，那种同时把握多条线索的能力，以及那种利用多个不同来源进行论证的能力，对数学而言都是相当陌生的。

——雅各布·**T.** 施瓦茨，《数学对科学的消极影响》（**1960**），

转引自《离散的思考：论数学、科学和哲学》

（马克·卡克、吉安-卡洛·罗塔、

雅各布·**T.** 施瓦茨编），**1992**年

中文版序

达尔文及其著作《物种起源》对生物学和社会学等领域的影响是无与伦比的。在《新科学家》杂志2012年所做的一次读者投票中，《物种起源》位居最具影响的十大科普书首位。以自然选择为基础的进化理论是达尔文进化思想的精髓，这个理论主要包括进化、渐变、物种形成、共同祖先、自然选择，以及进化改变的非选择机制等六个方面。被誉为“达尔文猎犬”的道金斯在评论科因的新著《为什么要相信达尔文》时，曾说得很严厉：“我曾经说过，任何不相信进化论的人，一定是愚蠢、狂妄，或者无知，后面我又很小心地加上了‘无知不是罪过’。现在我需要更新我的言论，任何不相信进化论的人，他就是愚蠢和狂妄……”我们更熟悉的应该是杜布赞斯基的那句名言：“如果不从进化的观点理解，生物学的所有东西都说不通。”

一个生命现象有近因（proximate cause）和远因（ultimate cause）两个方面。我们所知晓的一些生物学科学问题的规律，多是一个模式（pattern），一个趋势，不是简单的、物理学中“是”或“不是”的问题。所以生物哲学有其特殊性。在我的浅显认识里，数学是有巨大威力的，可把复杂的现象和过程很漂亮地定量表达出来。在生物学领域，数学应该是一个强有力的工具，可定量描述复杂多样的生命现象和生命规律。但造物主把生命塑造得太复杂了，要精细定量描述生命世界的规律，似乎也是难以想象的事情。比如大自然中植物花的颜色和形状、叶的形态，以及动物的个体大小、形态特征、行为特征、生理特征，一直到分子特征等，它们如何在进化长河中保留和延续下来，如何产生新的性状，存在哪些精细的调控机制等，对此我不知道能否用数学精确描述出来。

生物学与数学的结合产生了理论生物学、理论生态学、数学生态学等学科领域。数理统计在生物学研究中的应用也日趋普遍和广泛。对于生态学中的一些复杂现象的数据分析，各种数理统计方法的使用无疑提供了强大的支持。

那么达尔文的进化理论是否可以用简明精确的数学语言来表达呢？本书作者进行了一次大胆尝试，试图用数学语言来阐释达尔文的进化理论。作者的中心论题是利用软件的思想解释计算机和生物圈的可塑性，根本

思想是借助随机突变和自然选择来实现进化，从数学上证明达尔文的进化理论。这个思路可以表述为没有程序员的编程。

生命的出现是偶然的，是没有设计者的。本书提出了一个数学理论，“元生物学”（metabiology）。元生物学处理软件，也就是遗传信息和DNA。冯·诺伊曼在关于自我复制自动机的论文中，提出了“DNA=软件”的思想。生命作为不断进化的软件，这是很有启发性的。莫诺也说过：“大自然是一个勤杂工，是一个修补匠。你凑合着用旧的东西，你给它们打补丁，你修补它们使得它们可以再利用。”生命的起源可以理解为软件的起源，也就是DNA的起源。DNA是在每一个细胞中发现的通用编程语言，是一种强大的编程语言，几乎可以表达任何用于构造和运行一个有机体的可能算法和指令集。

生命是可塑且富有创造性的。生物创造性，包含生物的创新性、丰富性和多样性。我们如何能基于静态、永恒而完美的数学，构造出可塑且富有创造性的生命呢？作者给出的答案是：生命是富有创造性的、可塑的软件，而物理学是刚性的、机械的硬件。

生命起源、物种起源、进化过程，这些一直是生物学界的核心话题。随着新技术、新方法的产生和运用，尤其是进入组学时代，人们对生物本质的了解会越来越深入。用数学语言阐释达尔文的进化理论是一种有益的尝试，也许会为我们认识生物的本质打开一个新的窗口。

作者相信，“如果达尔文理论如它的信奉者所相信的那样简单、本质和基础，那就应该存在一个同样基本的关于它的数学理论，通过它可以一般、精确且抽象地表达达尔文理论的思想，如同我们在纯数学中习以为常的那样”。然而，作者也承认，“生物学实在是太复杂了，与数学已经相去甚远。虽然元生物学在数学上很有前景，但元生物学与真正的生物学的相关程度还有待观察”。这也是我们在阅读时需要留意的。

王德华

中国科学院动物研究所研究员

英文版代序：解题家与理论家 *

* 节选自：Gian-Carlo Rota, Indiscrete Thoughts, Boston: Birkhäuser, 1997, pp. 45–46.

数学家可以分为两种类型：解题家与理论家。尽管很容易找到这两种类型的极端例子，但大多数数学家是两者的混合。

对于解题家而言，数学的最高成就是解决一个已被认为无望解决的问题。即使答案可能是笨拙的也无关紧要，紧要的是，它应该是第一个被证明为正确的答案。一旦解题家找到了答案，他将对此永远不再有兴趣。在听到新的、更简化的证明时，他会有些不屑一顾，也会觉得非常无聊。

解题家本质上是一个保守主义者。对他来说，数学是由一系列需要克服的挑战构成的，是一条充满问题险阻的道路。陈述数学问题所需的数学概念被默认为是永恒的、不可改变的。

在他看来，数学论述是次一等的活动。他对新的理论总是充满怀疑，因为擅入者必须通过解决挑战性的问题来证明自己的价值，才能够获得重视。解题家厌恶一般化，尤其是那些使他的答案变得无关紧要的一般化。

解题家是年轻数学家的榜样。当我们向公众描述数学的成就时，解题家是我们推崇的英雄。

对于理论家而言，数学的最高成就是一个能让我们对某些以前不可理解的现象突然有所理解的理论。数学的成功并不在于解决问题，而在于使它们变得无关紧要。荣耀的时刻是发现一个新的理论，它不解决任何老的问题，却使它们变得无关紧要。

理论家本质上是革命者。从过去沿袭下来的数学概念被认为只是那些尚有待发现的更一般的概念的不完美实例。数学论述则被认为是比数学研究更困难的活动。

在理论家看来，唯一会永存的数学是定义。伟大的定义是数学对世界的

贡献。定理作为必要的恶而被容忍，因为它们在定义的理解中起到了辅助作用——或者理论家所不情愿承认的，起到了核心作用。

理论家经常会遇到不被数学界认同的问题。而他的慰藉是，他确信（哪怕历史可能会，也可能不会证实这一点），在当前的问题被遗忘很久以后，他的理论还存在。

如果我是一个太空工程师，正在寻找数学家帮我发射火箭，那我会选择一个解题家。但如果我寻找的是一个给我的孩子良好教育的数学家，那我会毫不犹豫地选择理论家。

吉安-卡洛·罗塔

中文版前言

我很高兴应邀撰写《证明达尔文：进化和生物创造性的一个数学理论》的中文版前言。在我写的所有书中，这是第一本用中文出版的。

表面上看，这本书的理论色彩很浓，但它事实上与技术和制造有着很多关联。在一篇关于自我复制的自动机的论文（宣读于1949年，出版于1951年）中，约翰·冯·诺伊曼意识到，计算技术与生物学的核心数学思想都是相同的一个，即软件的思想——软件解释了计算机和生物圈的可塑性。这也正是本书的中心论题。

冯·诺伊曼还意识到，计算机可以制造出其他计算机和一般的实体物件。在半个世纪后，这个预见现在终于变成了一种新的制造技术：增材制造或3D打印。这种革命性的新技术（3D打印机有可能成为一种通用制造设备）正迅速在多个不同的应用领域得到发展。下面就是一个例子：《华尔街日报》最近报道了，一家中国企业利用3D打印技术在24小时内建造了10所房子（http://blogs.wsj.com/corporate-intelligence/2014/04/15/how-a-chinese-company-built-10-homes-in-24-hours/ ）。

所以一个根本思想最终会产生巨大的实际应用。

那么本书的根本思想又是什么？尽管他在书中没有这样子说，但达尔文的根本思想可以表述为，存在没有设计师的设计 。所以本书的根本思想也不妨表述为，存在没有程序员的编程 。通过数学证明借助随机突变和自然选择实现进化是可能的，我的书试图从数学上证明达尔文的进化论。

我还应该更新一下对于本书第七章提到的安德烈·罗西可能革命性的新能源技术（一种尤其有希望的利用氢和镍实现的低能量核反应）的质疑。就在几天前，我很高兴地读到一条新闻，获知这种能源技术将在天津华苑工业园新成立的镍氢电能研究中心专门展开研究。

3D打印、低能量核反应以及数字生物学，它们无疑将给我们带来一个真正令人惊叹的未来。

格雷戈里·蔡汀

2014年**5**月于里约热内卢

英文版前言

本书的目的是试图揭示生物学深层的数学结构，展现隐藏在生命中的数学内核。我将这个只有三岁的新兴领域命名为“元生物学”（metabiology）。仍有许多工作要做。这一理论工作与实际的生物学之间的关联程度还有待观察。不过，我觉得是时候将这种思考生物学的新方式公之于众了。

促使我创建元生物学的是一本由我的朋友戴维·贝尔林斯基（David Berlinski）撰写的著作，《恶魔的迷思》（*The Devil's Delusion* ）。在这本引发争议的书中，他对达尔文主义提出了激烈的质疑，并将生物学视为与理论物理学截然相对的一种学说。这本书是我对戴维的回应，也是我试图寻找补救的一次尝试。

本书实际上是一门名为“元生物学：生命是不断进化的软件”的课程。该课程是我在2011年4月至6月间在里约热内卢联邦大学（UFRJ）讲授的，是我的朋友、诗人/数学家理查多·库布鲁斯理（Richardo Kubrusly）主持的“科学技术的认识论与历史”的系列课程之一。这不是一门数学课程，而更像是一门哲学和思想史课程，是关于如何以及为什么用数学去研究生物学的课程。

我希望你们喜欢阅读本书，就如同我很享受教授它一样。教授这门课程使我的想法在脑海里变得更清晰，一切终于井井有条了。

本研究得到了COPPE/UFRJ的院长，路易斯·平格利·罗萨（Luiz Pinguelli Rosa）教授，以及CAPES的外国访问教授项目提供的资金支持。

我要感谢布宜诺斯艾利斯大学以及瓦尔帕莱索复杂系统研究所，在我的多次访问期间，我在那里介绍了这些新想法，并受益良多。其他许多机构也邀请我去介绍元生物学：我要特别感谢伊利亚斯·考斯蒂瑞斯（Ilias Kotsireas）教授为我举办“蔡汀在安大略”的讲座系列，感谢海法大学的凯撒里亚·罗思柴尔德研究院、计算机科学系和数学系邀请我做知名学者讲座系列，感谢吉姆·克拉奇菲尔德（Jim Crutchfield）和乔恩·马克塔（Jon Machta）邀请我参加桑塔费研究所的一个会议，使元生物学得以在上面“正式亮相”。本书的第五章正是我在桑塔费所做的演讲。

我还要感谢安娜·巴赞（Ana Bazzan）和西尔维奥·达门（Silvio Dahmen）邀请我参观南里奥格兰德联邦大学。在那里，我一边撰写此书，一边做了三场元生物学的讲座，多有启发。

此外，如果没有我的妻子，弗吉尼亚·玛丽亚·丰特斯·贡萨尔维斯·蔡汀的支持，也就不会有元生物学［我将它定义为一门与生物学平行的领域，主要处理人工软件（计算机程序），而非自然软件（DNA）的随机演化］。这是我们共同努力的结果，就好似我们三岁的孩子。弗吉尼亚的研究领域是哲学。

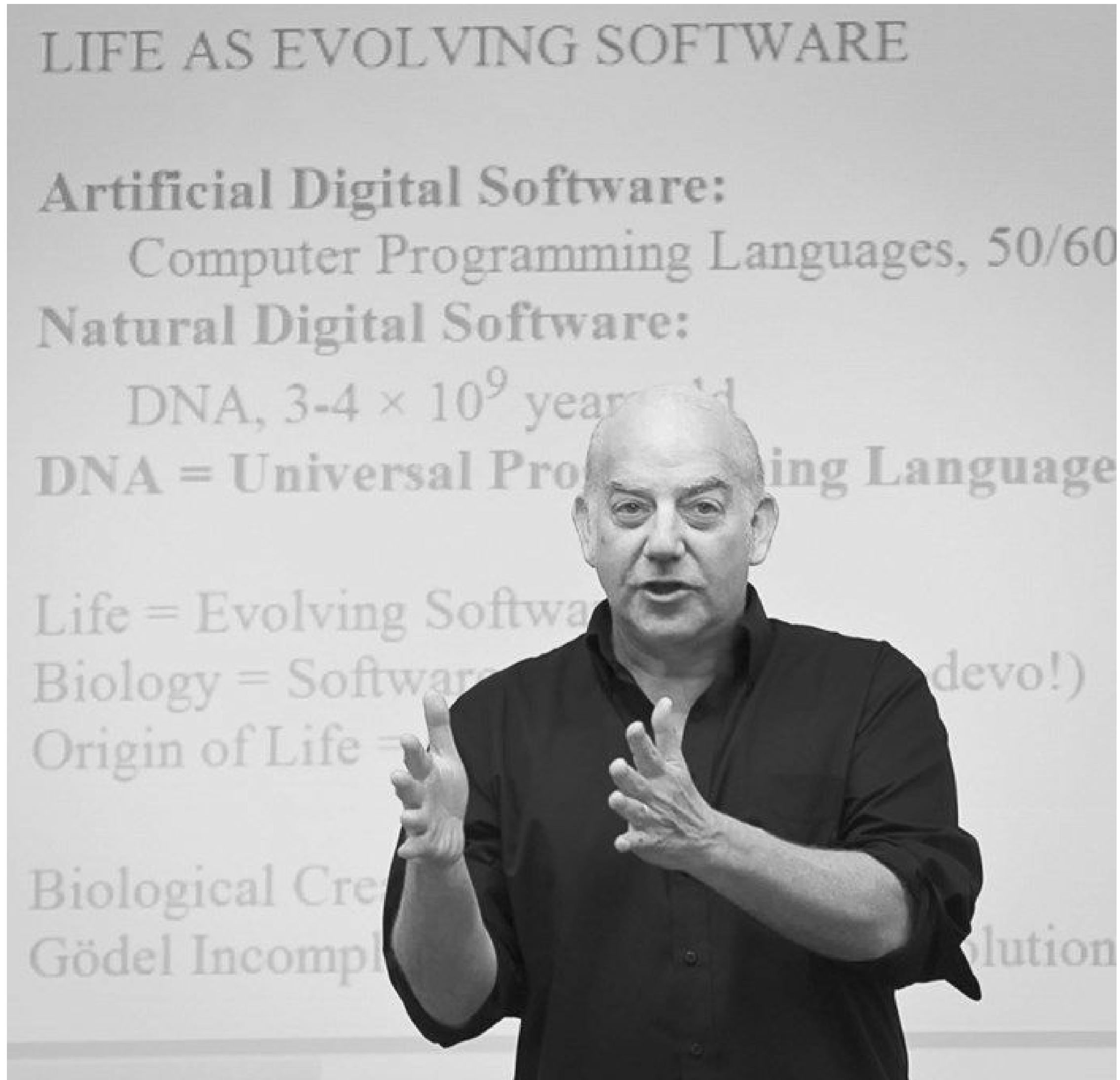
然而，本书是献给约翰·冯·诺伊曼的，这大概有点出人意料。在撰写本书时，我越来越觉得自己是站在了他的肩膀之上。你会在书中看到这其中的原因。

冯·诺伊曼是匈牙利人，但有些人却认为他是一个伪装成人类的外星人。他非常聪明，并仔细研究过人类，所以能够很好地模仿人类！

本书每章开头的美丽插图都来自恩斯特·黑克尔（Ernst Haeckel）的《大自然的艺术形式》（*Kunstformen der Natur* ）一书。它们展现了大自然无比旺盛的创造性，而本书正是试图为此提供一种解释。在其最深层次，从广义的视角看，这其实是库尔特·哥德尔著名的不完全性定理的一个推论，只不过它是这个极为消极的定理的一个积极方面。

生物创造性和数学创造性没有什么不同。阅读本书，你将找到答案！

格雷戈里·蔡汀



2011年**4**月**29**日，格雷戈里·蔡汀在南里奥格兰德联邦大学的讲座上

（尼古拉·马亚尔拍摄）

第一章　引言：本书概述

像许多纯数学家一样，我喜欢“粉笔谈”：使用最少的技术辅助手段，借助黑板或白板展开即兴讲演。我会采用的另一种策略是在开始讲课之前，将所想讨论的主题先写在黑板上。这样当人们走进来的时候，他们一眼就能看到所有的关键想法。不过，在一个大礼堂里，是需要一台投影机的，否则任何人都将一无所见。

在对页，你可以看到我在巴西南部阿雷格里港的南里奥格兰德联邦大学大礼堂上所给出的本书概述。在第三页和第四页，我准备了四张幻灯片。它们把第二章至第四章的内容作了总结，概述了我使生物学数学化所用的策略。在读完这些章节之后，你应该重温一下这些幻灯片。这样，你将进一步理解它们所表达的含义。

你可能已经听过有人把DNA比做计算机程序？的确，我的核心思想可以归结为一句话：把这个比喻变成一个进化的数学理论。其实事实上，早在20世纪70年代，这样的数学工具就已经出现。更确切地说，我们把进化看做软件空间中的随机漫步。随机漫步是一个数学家很熟悉的思想，尽管我们漫步的空间比一般的空间要大得多。

我把这个新领域称做“元生物学”，因为它是实际生物学的一个高度简化的版本——不然我将无法证明任何定理。这些定理出现在第五章，那是本书的高潮部分，也是我在桑塔费研究所讲座的内容。第六章至第八章讨论元生物学中更宽泛的意涵，包括神学、政治学和认识论上的。本书最后还有两个附录。

在附录一中，你可以阅读约翰·冯·诺伊曼关于自我复制自动机的关键章节。在这篇论文中，冯·诺伊曼卓有远见地提出了“DNA=软件”的观点，这影响了西德尼·布伦纳（Sydney Brenner），他反过来又影响了弗朗西斯·克里克。这是我在撰写本书时，发现的一个了不起的事实。附录二则提供了数学专家可能会感兴趣的一些额外数学细节。

最后，如果你想进一步了解元生物学，我列出了一个简短的书单，可供进一步阅读。有些书和文献在帮助我提出使生物学数学化的策略时助益良多，还有一些则只是由于内容有趣而被我放了进去。它们都值得好好

阅读！

生命作为不断进化的软件

人工数字软件

计算机编程语言，具有五六十年的历史

自然数字软件

DNA，具有三四十亿年的历史

DNA=通用编程语言

生命=不断进化的软件

生物学=软件考古学（进化发育生物学！）

生命的起源=软件的起源

生物创造性=数学创造性

哥德尔不完全性→无止境的进化

软件的人类发现史

分子生物学的历史

薛定谔，《生命是什么？》

软件的发现：图灵/冯·诺伊曼，1936/1951

阿兰·图灵→冯·诺伊曼→西德尼·布伦纳→弗朗西斯·克里克

元生物学的历史

把生命定义为某种不断进化的东西（约翰·梅纳德·史密斯，1986）

给出了存在某种东西满足该定义的数学证明（2010）

使用后现代（后哥德尔）数学

算法信息论，可计算理论

复杂性理论，计算机科学

元生物学的数学（第一部分）

我们关于进化的玩具模型

一个不断突变的软件有机体计算出一个整数，然后停机

有机体的适应度=它计算出的整数

需要创造性：$N \to N+N \to N \times N \to N^N \to N^{N^N} \cdots$

进化=软件空间中随机漫步的爬山算法（增加适应度）

尝试K比特的算法突变M（其概率为2^{-K}），使有机体A变为$A'=M(A)$

仅当$A'=M(A)$比初始有机体A的适应度更好时，突变M有效

需要oracle来消除那些不能产生A'或者产生的A'不能停机的突变

A与B之间的突变距离$=-\log_2$(从A到B的单步突变的概率)=满足$B=M(A)$的最短程序M的比特长度

元生物学的数学（第二部分）

为度量生物创造性的速度/速率，我们使用

BB(N)=N的忙海狸函数=任意长度不超过N比特的程序的最大适应

度

计算BB(N)需要 N 比特的灵感

BB(N)比任意可计算函数增长得都快

不同的进化方式

穷举搜索：在2^N时间内达到BB(N)的适应度

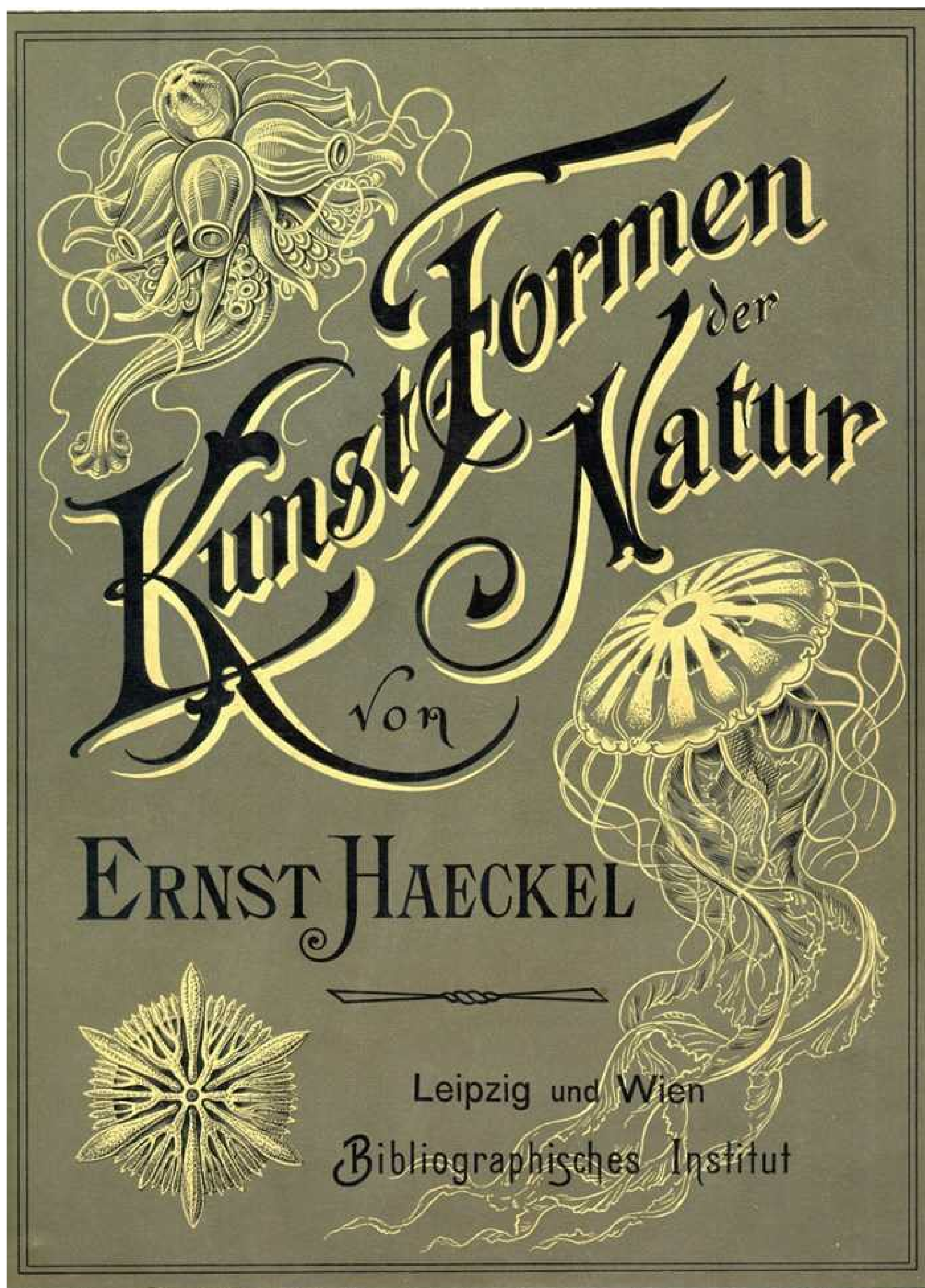
智能设计：在 N 时间内达到BB(N)的适应度

随机进化：在N^2到N^3之间的时间达到BB(N)的适应度

请注意

如果有机体是在机械地、以算法形式地改进，比如序列A, A', A'', …是可计算的，那么其适应度只能按可计算函数那样增长

第二章　生命作为不断进化的软件：不断突变的软件的进化



恩斯特·黑克尔的《大自然的艺术形式》

夏日的一天，你抬头往窗外看，看到了什么？灌木，树木，花，鸟，虫，鱼……一个充满生物多样性的世界。大自然的多样性和丰富性是如此令人震撼……达尔文的进化论真能解释这一切旺盛的创造性吗？生物学家相信就是如此。然而，如果你对比生物学理论与物理学理论，如果你从一个数学家的角度看生物学，事情就并不那么令人信服了。存在许多经验证据支撑达尔文理论，但却没有数学证明。

记得有一件轶事，在普林斯顿高等研究院的一次晚餐上，一位年轻的天体物理学家自豪地向哥德尔描述自己的最新发现，结果只得到了哥德尔这样的回应："我不相信经验科学，我只相信先验真理！"的确，哥德尔确实有此观点。如果达尔文的理论如同生物学家认为的那样根本，那么就应该存在一个一般性的、抽象的进化数学理论，它能从数学上把握达尔文理论的本质，并对此加以发展。

而这正是我们在此所要做的事情。还记得开普勒的《世界的和谐》、牛顿的《自然哲学的数学原理》以及拉普拉斯的《宇宙系统论》吗？是它们首先揭示了支撑物理世界的数学结构（我有幸拥有一本两百年历史的拉普拉斯著作的原版）。但考虑到生物学与物理学如此不同，我们该如何构建一个支撑生物学的数学结构？

显然，不是使用理论物理学的微分方程！要想发展生物学的"理论物理学"，一个生物学的基本数学理论，我们必须使用一种不同类型的数学。微分方程在这里没有用，一点用都没有。

生物学的本质究竟为何？的确，它的本质就是信息。即便是理论物理学，甚至量子力学，现在也都开始研究信息：量子比特。但生物学是另一种类型的信息：算法信息。当人们说DNA像一个计算机程序，当进化发育生物学（evo-devo）把胚胎发育描述为DNA程序，那指的就是算法信息。我们这种能应用到生物系统和生命的新型"理论物理学"，要处理的正是这类信息。

甚至在开普勒、牛顿和拉普拉斯之后，还有人认为生物学是不同的，每个生命都内含一个神圣的火花。不过，根据达尔文的理论，我们并没有神圣的火花。实际上，整个世界是神圣的、创造性的。生命的出现是偶然的，而非设计的。这里，我们为此提出了一个数学理论，称为"元生物学"。

元生物学是一种新型的"理论物理学"。相较于使用微分方程的理论物理

学与实际物理世界之间的差异，元生物学与实际生物世界的差异更大，其原因在于，发现生物学的数学结构要更难。从表面上看，在生物学中，由于生物过于复杂，有太多的例外，似乎不可能得到一个类似理论物理学那样数学化的理论生物学（在理论物理学中，可以说，实际物理世界是可以借助数学直接构建出来的）。

元生物学处理软件，也就是遗传信息和DNA。不妨看看尼尔·舒宾关于进化发育生物学的著作《我们的身体里有一条鱼》。我们的身体充满软件，且都是非常古老的软件。我们有来自海绵的子程序，来自两栖类的子程序，来自鱼的子程序。在人类妊娠期的某个阶段，人的胚胎还出现了鳃！每个细胞含有DNA软件的完整副本，相当于包含整个生物历史，因为进化只做微小变化，它做可能的最小变化，就像我们在大型软件项目中所做的那样。你不能从头开始，你必须物尽其用。正如雅克·莫诺（Jacques Monod）所说的，大自然是一个勤杂工，是一个修补匠。你凑合着用旧的东西，你给它们打补丁，你修补它们使得它们可以再利用。

事实上，它类似考古学——生物学实际上是一门软件考古学！所以说，存在人工软件，计算机程序，也存在自然软件，DNA。大自然在我们之前很早就发明了软件。生命的起源其实是软件的起源，也就是DNA的起源。DNA是在每一个细胞中发现的通用编程语言，是一种强大的编程语言，几乎可以表达任何用于构造和运行一个有机体的可能算法和指令集。这是我们正在开始了解的一种编程语言，一种非常复杂的编程语言，一种历经数十亿年逐步积累而成的编程语言，如同印度教石刻寺庙的浮雕，神灵之上有神灵，层层堆叠……又如同使用多年而未刮除熔蜡的烛台……

我们的人工软件，我们的编程语言，与DNA相比要简单得多，而且我们知道它们的工作机理。它们是我们设计的，并且只有半世纪的历史，而非数十亿年之久。因此，我们并不去研究随机进化的自然软件（DNA），相反，我们打算发展一个与之平行的理论，一个关于随机进化的人工软件（计算机程序）的理论。这正是元生物学的研究内容。这比实际进化要简单，希望简单到足以让我们在其中进行定理证明，简单到足以让我们精确理解其机制和工作原理。

实际上，世界是由数学构成的这一概念并不始于开普勒、牛顿和拉普拉斯，它来源于毕达哥拉斯。元生物学是一种毕达哥拉斯主义的生物学。古希腊人起初用神话来描述世界，在其中一切都是有生命的：反复无常

的神，太阳，风，河流，树木……后来，古希腊人转向了逻各斯，相信宇宙是由定律统治的。

对于毕达哥拉斯来说，不仅自然定律是数学化的，而且在本体论意义上，世界就是数学的，世界是由数学构成的。现代理论物理学遵循了毕达哥拉斯的思想。而对于柏拉图而言，（数学）思想的世界比现实世界更真实。思想的世界是静态、永恒而完美的，而现实世界，也就是表象的世界，是短暂的。然而，生命是可塑且富有创造性的！我们如何能基于静态、永恒而完美的数学构造出可塑且富有创造性的生命？

同样的张力在法国大革命之前的启蒙运动中再次出现。启蒙运动不仅反对君主专制，也反对宗教。拉·梅特里在他那本著名的小册子《人是机器》（1748）中，否认生命包含一个神圣的火花。拉·梅特里是一名医生，他通过解剖人体以了解人体的运作机理。他的结论是，人体是一部非常复杂的机器，但终究只是一部机器。

我们已经比拉·梅特里更进了一步。现在，我们知道关于计算机的一切，也了解硬件与软件之间的区别。的确，人是机器，但如果你想了解进化，那你必须聚焦到软件上，因为是软件在进化并促使硬件发生改变。软件比硬件更重要。因此可以说，本书讨论的是：人是软件，而非人是机器。

在马塞尔·帕尼奥尔（Marcel Pagnol）于20世纪30年代执导的法国电影中，乡村牧师和教师是最好的朋友，尽管其中一人是信徒，而另一人是无神论者。他们总是用这一点相互取笑对方。同样的张力在今天的美国，在神创论与更传统的生物学家之间的政治斗争中依然可见。

即便时至今日，传统的生物学家仍对如下事实感到惊讶：无细胞核的单细胞生命在地球形成两亿年后就出现了，而有细胞核的细胞用了二十亿年时间才得以出现。他们也怀疑这地球上的生命种子要么是偶然播种的，即所谓的“胚种论”，要么是故意种植的，即所谓的“定向胚种论”。你可以在弗朗西斯·克里克的《生命》、弗雷德·霍伊尔的《智能宇宙》（*The Intelligent Universe* ）以及马丁·诺瓦克的《超级合作者》中发现这样的观点，所以它绝对不是极少数人的观点。在霍伊尔那本颇具先见之明的书中，他甚至把生物学比做一个乱糟糟的计算机程序，后者的进化像白矮星那样通过吸积演变为超新星——这恰是元生物学的核心主题，也是舒宾的《我们的身体里有一条鱼》一书所阐述的进化发育生物学的核心主题。

重复一遍问题：生命是可塑且富有创造性的！我们如何能基于静态、永恒而完美的数学构造出可塑且富有创造性的生命？为此，我们将使用后现代数学，即1931年哥德尔和1936年图灵之后的数学，这是一种开放的而非封闭的数学，是一种关于创造性的数学。

我们需要的是一个开放的、非还原论的数学，因为生物圈的创造性是我们要讨论的关键议题。生物创造性 （生物创新性、丰富性和多样性） 长久以来一直不见于进化论的标准表述。不过，在恩斯特·黑克尔那里，情况却有所不同。黑克尔被认为是德语世界的达尔文。他向德语世界介绍了自己版本的达尔文理论，并因此发了财。他的书成了当时的畅销书，而他的豪宅现在成了一个生物博物馆。黑克尔给出的进化的一个证据是他那个著名的（或臭名昭著的）学说：个体发育（ontogeny）重演系统发生（phylogeny），也就是说，胚胎发育过程或多或少重演了有机体的进化历史——这个主题后来得到了进化发育生物学的扩展和修正。



系统发生学博物馆

上图是我的妻子弗吉尼亚在耶拿拍摄的黑克尔故居的照片，现在它已经

是一个博物馆。注意在房子墙上的生命树以及树上的ontogenie和phylogenie字样！

如果你对生物创造性感兴趣，你应该阅读黑克尔的两本书：《海洋的艺术形式》（*Art Forms from the Ocean* ）和《大自然的艺术形式》，其中包含了许多奇妙而惊人的展示生命形态多样性的插图。它们分别于2009年和2010年由普雷斯特尔出版社重印，并增补了一些历史注释。

也可以看看斯蒂芬·古尔德的《奇妙的生命》。这本书主要介绍了寒武纪生命大爆发，介绍了由大自然所尝试的大量令人惊讶的身体形态规划，这是一种探索所有简单可能性和简单程序的组合式爆炸。事实上，这也正是斯蒂芬·沃尔弗拉姆（Stephen Wolfram）所说的"挖掘计算的宇宙"（mining the computational universe），即尝试所有可能的简单程序。这是他常讨论的一种设计策略，具体可参照他的《新科学》（*A New Kind of Science* ）一书。

所以大自然是极富创造性和创新性的。在此不妨让我们看一下一个流行的用数学讨论生物学的方法，种群遗传学。它由罗纳德·费希尔、休厄尔·赖特、J. B. S. 霍尔丹、威廉·汉密尔顿、约翰·梅纳德·史密斯、理查德·道金斯以及马丁·诺瓦克等人提出，可以说是一个优美的领域。但不幸的是，种群遗传学将进化定义为因竞争或因环境选择压力所致的、种群中的基因频率变化。有限的基因库是固定的，因此根本没有创造性可言。与之相反，元生物学面对的是一个极其广阔的可能性空间，一个软件空间，从而让我们有可能讨论新基因从何而来。事实上，这正是元生物学的核心要义所在。不过，元生物学并没有太多关注种群、竞争或者环境。因此，种群遗传学和元生物学是互补的，它们处理不同的问题。

再次重复一遍问题：生命是可塑且富有创造性的！我们如何能基于静态、永恒而完美的数学构造出可塑且富有创造性的生命？答案就是：生命是富有创造性的、可塑的软件，而物理学是刚性的、机械的硬件！

生物圈充满软件，每一个细胞是由具有三四十亿年历史的软件所控制的。我们的人工软件仅仅只有五六十年的历史。但直到我们发明人类计算机编程语言，我们才有可能意识到，自然界充满软件。这个世界充满软件，即使在我们知道那是软件之前！软件是生物圈可塑性的原因——通常的机器是刚性的、机械的和死的，而软件是活的！

此外，生命的起源其实就是软件的起源，是在软件控制下的实体（细

胞）的自发涌现，以及这个软件的DNA语言的自发涌现。我们身体的每个细胞都含有整个人完整的DNA，尽管根据器官的不同，它只使用这个软件的一部分。地球上的每一个有机体在本质上都采用了一套相同的DNA语言——到目前为止，还没有证据表明存在其他独立的生命创造和生命起源。

诺贝尔奖得主西德尼·布伦纳曾与弗朗西斯·克里克（沃森与克里克中的克里克）共用一间办公室。他那一代的分子生物学家大都声称曾受薛定谔的《生命是什么？》（1944）一书的启发。但在自传《我的科学生活》（*My Life in Science* ）中，布伦纳把这个荣誉归给了冯·诺伊曼的自我复制自动机理论。冯·诺伊曼在希克森研讨会上的论文《自动机的一般逻辑理论》包含了许多生物学的核心思想，它们的提出甚至早于 沃森和克里克发现DNA。在布伦纳看来，它们是真正了不起的数学预言。

多年前，我有幸在麻省理工学院，在一场由罗尔夫·兰道尔（Rolf Landauer）和爱德华·弗雷德金（Edward Fredkin）组织的讨论计算的物理学的会议上遇见布伦纳。布伦纳做了一个关于分子生物学的精彩讲座，并对自动机理论在冯·诺伊曼之后的发展表示了兴趣。

还是在我学生时代，通过阅读冯·诺伊曼的《自动机的一般逻辑理论》，我了解到，是图灵在1936年的《论可计算数及其在判定性问题上的应用》论文首先提出了灵活机器、通用机、通用计算机，以及区分软件和硬件的思想。DNA被认为是一种通用编程语言，强大到足以表达任何算法。布伦纳把DNA包含构建（和运行）有机体的软件的思想归功于冯·诺伊曼。这个思想现在由于进化发育生物学（研究胚胎的形成过程是如何进化的）而广为人知。

正如我之前所说的，这些思想在舒宾的书中清晰可见，该书解释了我们是如何具有海绵、鱼类和两栖类的子程序的。要想理解人体内一些奇怪的事情以及人体设计中一些奇怪的特性，你必须将人与鱼的构造相对比。只需做微小变化就能将鱼转换为哺乳动物！

现在，让我们回到薛定谔在1944年提出的问题："生命是什么？"在1986年由牛津大学出版社出版的《生物学诸问题》（*The Problems of Biology* ）一书中，约翰·梅纳德·史密斯（我曾在北极圈以北的瑞典阿比斯库召开的一次会议上遇见过他）专门有一章对此进行讨论。火焰有代谢——为了保持形态，它们摄取物质，并释放物质。此外，它们能自我复制。然而，它们没有遗传以及变异或进化。而根据梅纳德·史密斯的观点，

生命在于进化，在于可塑性和创造性。

我的毕达哥拉斯主义生物学就是对于生命存在的一个数学证明。也就是说，我构造了人工的数学生命形态，并为此建立了一个极简的生物学模型，一个玩具模型，但包含所有核心的概念和特征，这样我可以证明它按照达尔文的进化论方式进化。这样，我在纯数学的毕达哥拉斯世界中发现了一个不断进化的生命形态。

我的有机体没有新陈代谢，没有形体，只有DNA；也就是说，没有硬件，只有软件。我研究不断突变的软件（实际上是一个不断突变的有机体）的进化，它在软件空间中随机漫步。而包含所有可能计算机程序的软件空间，则为这个有机体的所有可能设计提供了足够空间。

这是不是太简单了？如果我能使生命进化，那这就绝不简单！物理学家都已经非常习惯于他们所谓的“玩具模型”。毕加索说过：“艺术是一种帮助我们看清真相的谎言。”同样地，理论也是一种帮助我们看清真相的谎言。生物学家认为每一个细节都很重要，他们并不区分什么是首要的，什么是次要的，毕竟他们努力发现所有的东西。然而，正如布伦纳在他的自传中所强调的（詹姆斯·格雷克在他的《信息简史》一书中引用过），生物的能量和新陈代谢都不重要，重要的是信息，重要的是你从何处获得怎么做某事的指令。之后，就无需为能量的事情操心了！

所以我们的DNA是一个非常非常古老的软件，反复修补，绝不是干净、优雅和精心设计的。如果我们能重新开始，直接设计哺乳动物，我们自然能够做得更好。然而，我们不能重新开始，即使是对只有半个多世纪历史的软件技术和人工软件领域，我们都不能推倒重来，更不用说对有数十亿年历史的DNA了。

我们和黑猩猩具有几乎相同的编码蛋白质的基因，但用来控制哪些基因表达、哪些基因静默的许多DNA是不同的。换言之，低层的子程序不会发生大的变化，因为很多有机体依靠它们，它们有着广泛应用。但高层和更新的软件可以更容易地发生变化。

在短短的五十多年里，人类的编程环境已经变得非常高级：图形界面，以各种方式从因特网获取素材，等等。今天没有人会想从头开始，使用汇编语言对裸机编程，就像我以前为了谋生曾做过的那样。我们把高级编程语言和编程环境认为是理所当然的。我们不能重新开始。所有的决策都是基于当时已有的技术，比如低效率的“qwerty”打字机键盘，当初

这样设计是为了避免早期的打字员因打字过快而卡住打字机，而这样的问题是现代键盘所没有的。

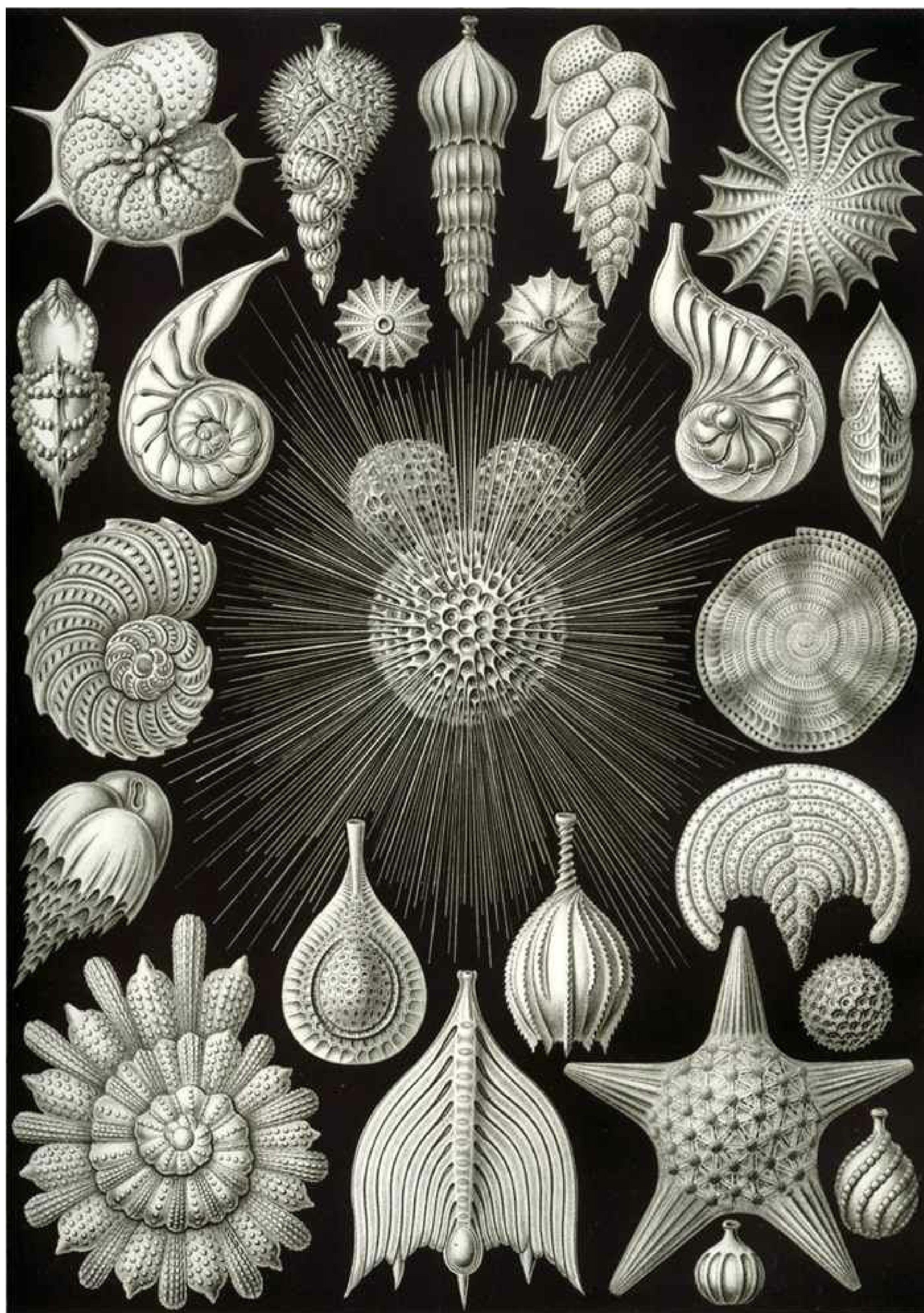
一如冯·诺伊曼的数学预见生物学后来的发现的方式，我的工作（元生物学），为了保持数学的优美，要求是算法 突变而不是点突变，是高层突变而不是低层突变。目前尚不清楚发生在生物学上的是何种程度的算法突变。因此，正如我的妻子弗吉尼亚向我指出的：元生物学提出了这样一个问题，即实际有机体中的突变机制究竟属于多高层级？

这一章到此为止。现在，你应该对生命作为不断进化的软件的思想有了相当的概念。我们已经看到，大自然在很久以前就发现了软件。在下一章中，我们将详细研究人类在晚近发现软件的充满惊奇的历史。而在之后的章节，我将解释如何将生命作为不断进化的软件的思想变成一个可以拿来证明东西的数学理论。然后，我们将进入第五章，我在桑塔费研究所的演讲，这也是本书的高潮部分。

一点提示 ：现有程度的元生物学还无法解决思维和意识的问题，虽然这些问题相当吸引人。

第三章　人类发现软件：作为生物学家的图灵与冯·诺伊曼

有孔虫



有孔虫

在本章中，我们将从元生物学的视角，重写分子生物学的早期历史以及软件的发现史，毕竟现在总是在重写过去以便证明自己的合理性。正如豪尔赫·路易斯·博尔赫斯指出的，我们创造了自己的祖先！

作为这种历史重写的一个例子，我们现在熟悉的是，伏尔泰把牛顿塑造成了一位具有机械世界观的无神论现代科学家的形象。但在《牛顿其人》（“Newton, the Man”）一文中，约翰·梅纳德·凯恩斯把牛顿描述为“最后的魔术师，最后的巴比伦人和苏美尔人”，而绝非第一个现代科学家，他更接近于浮士德而非哥白尼。牛顿花在炼金术和神学上的时间要比在数学和物理上的多，他还收集了大量中世纪炼金术的图书。我的朋友斯蒂芬·沃尔弗拉姆在他的书架上并排摆放着具有三百年历史的牛顿和莱布尼茨的神学著作（都是原版书，而非复印本）。牛顿的《数学原理》已经买不起了，但并没有很多人对他的神学著作感兴趣。

事实上，过去并不是偶然被重写，而是必然会被重写以便可以为现在所理解。关于该如何撰写科学史，可以参看黑尔格·克拉格（Helge Kragh）那本精彩的《科学编史学导论》（*An Introduction to the Historiography of Science* ）。

现在，就让我们从元生物学的视角重新审视计算理论和分子生物学的早期历史，找出那些指向元生物学的线索。

我们的故事充满惊奇，它要从哲学和数学的基础的问题说起，其中还涉及一个价值超过一万亿美元的技术的创立（这已经发生了），以及可能随后出现的第二个这样的变革性技术。这个故事甚至还与中世纪的魔法有关。

你想知道更多内容吗？那请继续往下阅读！

很少有人记得图灵在生物学的形态发生（morphogenesis）方面所做的工作，但图灵著名的1936年论文《论可计算数》对分子生物学的诞生间接地产生了巨大影响——它影响了冯·诺伊曼的自我复制自动机理论，后者影响了西德尼·布伦纳，他反过来又影响了弗朗西斯·克里克，发现DNA分子结构的沃森和克里克中的克里克。此外，冯·诺伊曼将图灵的思想应用到了生物学，这得到了近期的进化发育生物学漂亮的支持。其核心思想是：DNA是具有数十亿年历史的软件。这一点在图灵1936年的论文之前并没有人认识到，而按照冯·诺伊曼的观点，这进而引发了计算机硬件和软件的思想。

我们在前面的章节已经讨论过这一核心思想。不过或许在继续之前，我们应该总结一下已经讨论过的内容：

硬件	物理学	死的	刚性的	封闭的	机械的
软件	生物学	活的	可塑的	开放的	创造性的

自然软件	DNA	三四十亿年的历史
人工软件	计算机程序	五六十年的历史

牛顿式数学	连续数学、微分方程	用于物理学
后现代数学	离散数学、组合数学、算法	用于生物学

生命的定义（约翰·梅纳德·史密斯，《生物学诸问题》，1986）
某种符合该定义的东西存在的数学证明（2010）

还记得在莫里哀的戏剧《贵人迷》中那个惊讶地发现自己的一生原来一直都在说散文的绅士吗？我们就是那个绅士。我们的身体充满软件，它们一直都那里，但只有在发明了人工软件和人类的计算机编程语言之后，我们才恍然大悟，认出大自然的DNA软件。

软件一直都在我们身边，在每一个细胞中。那是古老的软件，但我们无法明白，直到我们自己发明了软件！此外，正如进化发育生物学所表明的，生物包含自身的历史，正如舒宾所说的你体内的鱼、你体内的海绵、你体内的两栖动物……生物学只不过是一类奇特的考古学，软件考古学。

人类做爱的目的是整合男性的软件（在精子中）和女性的软件（在卵子中）。这就是人们相爱的原因，因为他们想结合他们的子程序。所以在某种意义上，冯·诺伊曼发现了人类为什么会坠入爱河的原因。

此外，生命的起源（它现在依然神秘不可解）其实就是软件的起源——当然，这里的软件是指自然软件，而非人工软件。但我们似乎看到了解决问题的希望。斯蒂芬·沃尔弗拉姆的《新科学》可以被重新解释为一本关于生命起源的书。斯蒂芬的一个主要观点是，很容易得到一个组合的符号系统，使之成为一个通用图灵机或通用计算机。也就是说，很容易用几乎任何离散数学部件构建出一台计算机。他将这称为“通用的普适性”（the ubiquity of universality）。在哲学层面，这意味着一般意义上的生命的起源并不是那么令人吃惊。当然，它在地球上的特定实现则是另一回事。但不管怎样，谢谢你，斯蒂芬！

泛泛而谈就说到这吧！现在让我具体回顾一下阿兰·图灵（以及同时代的埃米尔·波斯特）是如何通过发明计算机来帮助澄清一个关于数学的基础的问题——显然，是大自然率先发明了计算机和硬件/软件，不过它并不关心像数学的基础这样的问题，可塑性倒是它关心的。

首先，让我们来谈谈一个古老的梦想，确定性知识，或者按博学的莱布尼茨的说法，机械性知识。对它的推理应该像算术那样确定，其真值应该像2+2=4那样显而易见。这样便不再有争论，莱布尼茨会说：先生们，让我们通过计算来确定谁是正确的！这是个多么美好的梦想！

莱布尼茨并没有在今天所谓的符号逻辑或数理逻辑方面做太多工作，但他极其清晰而有力地阐述了目标。因此，他被认为是现代逻辑之父或者之祖。莱布尼茨对于任何主题都没有投入太多时间，他是杂食性的，兴趣广泛。例如，他还发明了二进制算术，以及能够做乘法运算的计算机器——帕斯卡最初发明的计算机器只能做加减运算。

之后的许多年，许多逻辑学家致力于莱布尼茨的确定性知识或者机械推理的梦想：德摩根、布尔、皮亚诺、弗雷格、罗素、希尔伯特、哥德尔、图灵、波斯特，等等。但该梦想并没有实现，事实证明它不可能实现 。与确定性和机械性知识相反，哥德尔发现了不完全性，图灵发现了不可计算性。但在此过程中，图灵还发现了完全的/通用的编程语言、硬件、软件以及通用机。

这个梦想的一个里程碑是德国数学家希尔伯特提出的莱布尼茨梦想的改进版。希尔伯特想要为所有的数学提供一个形式化公理理论，欧几里得的《几何原本》的机械化版本，它将涵盖所有的数学，而不仅仅是几何。这其中的关键是，它应该能够机械地检查证明是否正确，推理是否遵循所有的规则。要做到这一点，我们需要发明一个细致的人工语言，

强大到足以表达所有可能的数学推理、所有可能的数学证明。

但在1931年，哥德尔证明了这是不可能的：永远不可能发现这样的机械通用语言，通过它，我们能够证明所有的数学真理。这被称做不完全性。随后在1936年，图灵发现了实际上存在完全的或通用的机械语言，只不过不是表达数学证明，而是进行数学计算。接下来的历史就是：现代计算机诞生了！

哥德尔是如何摧毁希尔伯特和莱布尼茨的梦想呢？通过构造一个断言它自己不可证的算术断言："我是不可证的"——它是可证的，当且仅当它为假时。

图灵所用的方法则有所不同，没有那么巧妙，但更深刻。他研究什么机器能够计算，并注意到大多数实数是不可计算的，因此存在形式证明所不能确定的数值，否则人们就可以机械地遍历所有可能的证明，从而系统地计算这些不可计算实数的值。

实际上，这才是我更为欣赏的表述图灵基本结论的方式。通常的解释方法是使用著名的停机问题。图灵表明，不存在系统的方式，不存在机械过程，也没有形式化公理理论，可以用来判定一个自包含的计算机程序是否最终会停机。你可以开始运行它，并一步步地计算，但要判定它是否会一直运行下去，一般来说是不可能的。

这样，我们有了计算机编程语言，通用且强大到足以编写任何算法。但同时我们丧失了确定性，丧失了机械推理。这个梦想已经彻底破灭。

不过，这不值得担心！根据埃米尔·波斯特（他虽然不及哥德尔和图灵那么有名气，但他们其实是处于同一个层级的；他也提出过图灵机和不完全性定理，但在数年内都未发表），公理化方法，尤其是希尔伯特的形式化公理，只不过是一个可怕的错误，一个混乱的误解。

在波斯特看来，数学不能 提供确定性，因为它不是封闭的、机械的，它是创造性的、可塑的、开放的！听起来很熟悉？的确，我们在前面的章节中一直在谈论生物的创造性，现在我们发现在纯数学中也有类似的东西！所以数学是创造性的，不是机械的；数学是生物，不是机器！我刚才说，数学和生物学的创造性并没有多大的不同——我们将在下一章看到更多的细节。

这一点在哲学家保罗·费耶阿本德的两本书书名中得到了很好体现：《反对方法》和《告别理性》。费耶阿本德基于他对科学史的阅读（不过，他并未提及哥德尔和图灵），强调科学的创造性和想象力（一句话，无政府状态）。但在我看来，“反对方法”可以成为关于图灵停机问题的不可判定性的图书的最好书名，而“告别理性”则可以成为关于哥德尔的不完全性定理的图书的最佳书名。费耶阿本德出于哲学原因在科学世界中所反对的，在数学世界中相应的就是数学定理——因此，可以证明不存在解决所有数学问题的通用方法。

然而，正如数学家吉安-卡洛·罗塔在《数学对哲学的消极影响》（“The Pernicious Influence of Mathematics upon Philosophy”）一文中所指出的，哲学实际上是一门为自己那些从骨子里本能相信的东西寻找坏理由的艺术。事实上，潜意识中的种种情绪渴求促使我们得出结论，而这时理性不过只是配角。这样的睿智言论让罗塔在哲学圈中并不受欢迎，但我喜欢哲学，我也认为罗塔的言论有些道理：哲学不应该试图去过多地模仿数学，尤其是希尔伯特倡导的形式化公理方法。因此，正如罗塔所指出的，如果我们能精确地定义我们的术语，那就意味着哲学的终结。形式化公理体系不是创造性的……

实际上，存在多种不同类型的数学创造性。有些人，或者说大多数人，感兴趣的是，形式化公理理论中的创造性=在当前的范式下，找到一个证明=常规科学（库恩）。而我本人更感兴趣的则是，“野蛮的创造性”（德勒兹）=改变形式化理论=新公理、新概念=范式转变（库恩）=反对方法（费耶阿本德）！

现在轮到冯·诺伊曼的自我复制自动机了。冯·诺伊曼于1951年从哥德尔那里获得了这样的想法，有机体内存在对该有机体的描述=构造有机体的指令=遗传信息=数字软件=DNA。首先，你遵照DNA中的指令构造该有机体的一个副本，然后你复制DNA，并将其插入新的有机体，接着你让新的有机体开始运行。在精子中没有无穷倒退，也没有所谓的“小人”！

相关详情，请参见附录一冯·诺伊曼关于自我复制自动机论文的核心部分。正是该论文启发了西德尼·布伦纳去剑桥与弗朗西斯·克里克合作。而克里克也需要找人合作，因为沃森发表完《自然》杂志上那篇著名论文后，已返回了美国。

所以克里克首先与沃森共用一间办公室，然后是与布伦纳。他不能单独

工作，他需要来自身边的灵感，他需要有个人整天陪他说话。弗朗西斯·克里克是顶尖的理论家，是战略家，是分子生物学建立过程背后的操盘手。而克里克的功劳里也有布伦纳的一半。你看，在沃森和克里克发现DNA的分子结构、四碱基的字母表（A、C、G、T）之后，我们仍然不清楚用这个包含四个符号的字母表写就的是什么，也不明确DNA是如何工作的。但克里克，在冯·诺伊曼和布伦纳的启发下，在内心某处萌发了一个想法：DNA是指令，DNA是软件。并且他意识到，重要的是这些信息如何在细胞中流动，以及信息如何转变成为蛋白质……

那么布伦纳当初是如何得知冯·诺伊曼在希克森研讨会上的论文？布伦纳还在南非时，在去牛津和剑桥之前，他曾有一位计算机科学家的同学，名字叫西摩·佩珀特（Seymour Papert），这个人后来到了麻省理工学院，与马文·明斯基（Marvin Minsky）合作。正是佩珀特，提醒布伦纳关注冯·诺伊曼的论文。（我从未见过佩珀特，但我认识马文。）

冯·诺伊曼对于自我复制的研究并没有止于他1951年所谓的运动学模型（它本质上是一个制造实体设备的规划）。在乌拉姆（我曾在洛斯阿拉莫斯国家实验室有幸见过他）的建议下，冯·诺伊曼将他的自我复制模型从物理世界搬到了坐标纸上，在二维平面上划分大小相同的方格，每一个方格都是一个有限状态机，一个所谓的元胞自动机（CA）。这些研究在他死后才出版。

冯·诺伊曼所使用的元胞自动机世界是一个同质、统一和完全可塑的世界。在这个世界中，一切都是软件和信息，没有硬件。这是一个存在魔法的世界：正确的魔法咒语将创造出任何东西。在这个世界中，有通用构造子和通用计算机。这听起来很好，但这个元胞自动机世界也存在一些问题：有机体更倾向于自我复制、原地踏步，而非自我改变、迈出步伐。

与图灵的通用机相比，冯·诺伊曼的自我复制和通用构造子的研究开始得到技术应用花费了更长的时间。这些应用包括物体打印机、3D打印机、新型柔性制造技术、可以打印自身的3D打印机（http://reprap.org），以及或许最终会实现的可以制造任何东西的通用工厂！

所以你看，图灵的论文已经产生了巨大影响，而且可能会有更多。计算机不仅是一种相当有用的技术，它也是一种具有深刻哲学影响的革命性的新数学。它揭示了一个新世界。

我倾注了一生中的大多数时间去探索这个新世界的一个小方面：利用计算机程序的大小作为复杂性的度量，将随机性定义为不可约的复杂性、算法上的不可压缩，并研究了我称之为停机概率的一个数Ω。Ω能简要地告诉我们具体某个图灵停机问题的结果。如果我们能够知道精确到N位的Ω的数值，这将使我们能够回答所有小于等于N比特长度的程序的停机问题。Ω浓缩了逻辑上和计算上不可约的数学信息。

通过掷硬币随机生成的程序的停机概率（Ω）是一个不无悖论的实数：尽管它定义简单，但其数值却最不可计算、最不可知，它表明了纯数学蕴涵无限不可约的复杂性。Ω可以被悲观地阐释为，人类知识是有限的。乐观的阐释（这也是我个人偏好的）则是，人们不能机械地做数学，直觉和创造性至关重要。事实上，在某种意义上，Ω是数学创造性的本质的结晶和浓缩——这又回到了埃米尔·波斯特的观点。

此外，正如我在2007年2月《欧洲理论计算机科学协会（EATCS）会刊》上的一篇文章中首次陈述的那样，停机概率Ω的无限不可约的复杂性表明，纯数学甚至比生物学还要生物学。生物学尽管非常复杂，但其复杂性是有限的，纯数学则有着无穷的复杂性。正是这个线索，才促使我试图创建元生物学。在2009年2月，也就是在《EATCS会刊》发文两年后，我宣布创立了元生物学。

所以你看，哥德尔、图灵、波斯特和冯·诺伊曼打开了一扇从数学到生物学之门，他们给了我们必要的概念工具包。我们需要后现代的、离散的、算法的数学去理解生物学，而不是牛顿微分方程，不是一些古老的数学或者数学分析。

下一页给出了一个大事记以及本章讨论所提到一些参考文献。在下一章，我们将深入具体细节，看看如何构建一个关于不断随机突变的软件的数学理论。遵从约翰·梅纳德·史密斯和西德尼·布伦纳的建议，我们将忽略身体、物质代谢和能量，而只考虑纯粹由软件构成的有机体。我会告诉你，我是如何建立一个数学理论的。在此之前，我已经成功做到过一次（算法信息论），希望现在能再次成功（元生物学）。正如你将看到的，成功的标准主要是基于美学的，因为数学是一门艺术。

我们将能够证明，达尔文进化论在我们的玩具模型中是有效的，并且令人惊讶的是，通过自然选择进化的有机体是停机概率Ω越来越好的下界，这是我之前所没有预想到的。这确实是一个惊喜。但翻过头看，这是必然的，并不奇怪，原因我们将在第五章中说明。

库尔特·哥德尔，**1931** *	自指："这个命题是不可证的！"	形式化系统和数学推理的不完全性	
阿兰·图灵，**1936** *	《论可计算数及其在判定性问题上的应用》	用于数学计算的形式化系统的完全性 =通用编程语言；通用图灵机=通用计算机	数学的理论哲学，提出了软件的思想，创造了一个数万亿美元的计算机产业（冯·诺伊曼）
图灵在生物学方面的后期研究	形态发生=牛顿式数学=偏微分方程=过时！	是冯·诺伊曼意识到图灵的工作能被应用到生物学中，而非图灵本人！	冯·诺伊曼开辟了数理生物学！元生物学的起源
约翰·冯·诺伊曼，**20**世纪**40**年代末至**50**年代初	自我复制自动机理论（自指 变成了自我复制！）**	通用构造子，物体打印机，3D打印机，柔性制造，自我复制的打印机！	通用工厂=未来的数万亿美元的产业？！
冯·诺伊曼于1957年英年早逝	1953年，沃森和克里克发表了关于DNA的文章		
西德尼·布伦纳，**20**世纪**50**年代末至**60**年代	受冯·诺伊曼而非薛定谔的《生命是什么？》启发的生物学家***	影响了克里克，与克里克共用一间办公室，重要的是信息=构造的指令=离散算法的软件	诺贝尔奖获得者
斯塔尼斯拉夫·乌拉姆****	元胞自动机世界，29种状态，4个邻居	完全可塑的世界，一切都是软件和信息，一个存在魔法的世界	世界是思想！打倒唯物主义！

* Martin Davis, *The Undecidable: Basic Papers on Undecidable Propositions* , *Unsolvable Problems and Computable Functions* , Dover, 2004.

** John von Neumann, "The General and Logical Theory of Automata," delivered 1948 at the Hixon Symposium on Cerebral Mechanisms in Behavior, Pasadena, California, and published in Lloyd Jeffress, *Cerebral Mechanisms in Behavior: The Hixon Symposium* , John Wiley and Sons, New York, 1951, pp. 1–41; John Kemeny, "Man Viewed as a Machine," *Scientific American* 192 (April 1955), pp. 58–67（介绍了冯·诺伊曼的自我复制自动机理论）; E. F. Moore, "Artificial Living Plants," *Scientific American* 195 (October 1956), pp. 118–126（对冯·诺伊曼的另一个回应）; John von Neumann, *Theory of Self-Reproducing Automata* , University of Illinois Press, Urbana, 1966（死后出版，由A. W. 伯克斯整理编辑）.

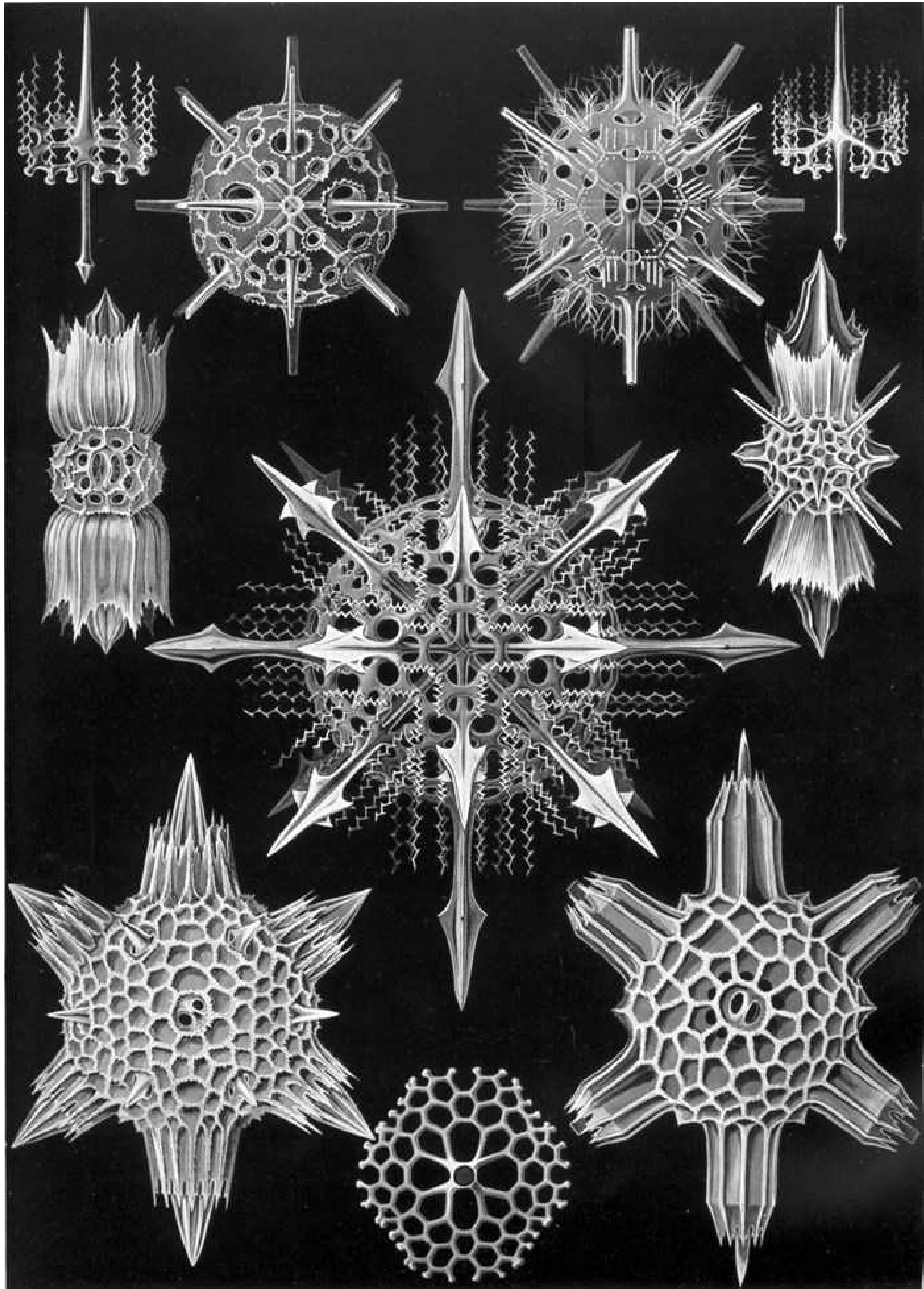
*** Sydney Brenner, *My Life in Science* , Biomed Central Ltd., 2001; Matt Ridley, *Francis Crick* , Eminent Lives, 2006.

**** Stanislaw Ulam, *Adventures of a Mathematician* , 2nd edition, University of California Press, Berkeley, 1991 (1st edition, 1983). 也可参见：Konrad Zuse, *Rechnender Raum* , Friedrich Vieweg & Sohn, Braunschweig, 1969（英文版翻译：Hector Zenil, *A Computable Universe* , World Scientific,

Singapore, 2012）.

关于世界的可塑性，可参见弗里曼·戴森对于完全绿色技术的愿景（*The Sun, the Genome, and the Internet* , Oxford University Press, 2000）：种子成长为房子而不是树木，孩子们通过基因工程来设计新的花卉，如此等等。也可参见：Allison Coudert, *Leibniz and the Kabbalah* , Kluwer Academic, 1995; Umberto Eco, *The Search for the Perfect Language* , Wiley-Blackwell, 1997. 这两本书都谈到了上帝用来创造世界的亚当语言，这种语言的结构直接反映了世界的内在基本结构。掌握这种语言会给我们上帝般的力量（就像在博尔赫斯的故事《帕拉塞尔苏斯的玫瑰》中所描述的）。

第四章　元生物学的数学：软件空间中的随机漫步



放射虫

正如我们在前两章所看到的，把生命看做不断进化的软件是一个很好的比喻。但这是一条我们能在数学上有所收获的进路吗？这是问题的关键。我认为是的，因为使用它，我们可以证明进化是以一个相当直接和自然的方式发生的，我等会儿会加以解释……

但在跳跃到元生物学的数学公式之前，我想先做些预备工作。我需要解释一下纯数学是如何工作的、它如何发挥作用，以及你能期望它为你做些什么，这样你才会同情地理解我关于进化的玩具模型，而不是认为它粗陋可鄙。

让我们先从两段话讲起，一段来自我已故的好友雅各布·T. 施瓦茨（我们习惯叫他杰克），他是一位兴趣异常广泛的杰出数学家，另一段则来自一位顶尖理论生物学家约翰·梅纳德·史密斯，他常给人以启迪。杰克关于数学方法局限性的完整论述（摘自杰克那篇引人思考的论文《数学对科学的消极影响》），大家可以看本书开头部分那三段看似自相矛盾的引文。在这里，我们看这句话就够了：

> 数学技巧只有在它是从触及某个问题的简单实质（如果这个问题有简单实质的话）的一点出发时才有效。
>
> ——雅各布·T. 施瓦茨

这话出自于一个曾在纯数学和应用数学等多个领域工作过的人，无疑具有真知灼见。

而下面这段梅纳德·史密斯关于生物学中的数学模型的论述或许更能说明问题：

> 人们可能很自然地会认为，要想了解一个复杂系统，必须构建一个包含我们对该系统所知一切的模型。但无论这个过程看上去多么合乎情理，在生物学中它一再被证明是徒劳的举动。这种方法会给人带来两个后果。其一，人们最终完成的模型太复杂，无法被人理解：模型的意义是简化，而不是混淆。其二，如果构造了一个足够复杂的模型，人们可以通过调整参数，让它做他所喜欢的任何事情：一个模型，如果它可以预测任何事情，那其实相当于它什么都不能预测。
>
> ——约翰·梅纳德·史密斯与厄尔什·绍特马里

（Eörs Szathmáry），《生命的起源》

此外，元生物学在某些方面更接近于理论物理学而不是纯数学。在理论物理学中，高度简化的模型，即所谓玩具模型，是他们所用的标准工具之一，也是其标准方法论的一部分。他们期望借此把握住某个场景的本质特征。

因此，具体到元生物学，我们希望找到最简单的、数学上最直截了当的，并且从中我们能证明生命的进化的场景，也就是能满足约翰·梅纳德·史密斯在《生物学诸问题》中的生命定义的最小系统。换句话说，我们试图找到最简单的可能数学生命形态！

可以非常确定的是，我们不是 去对生命系统做逼真的、高度细致的计算机模拟，这是所谓“系统生物学”的研究范围，一个非常热门的新领域。

我还想简单提一下构造一个数学理论的艺术，这些内容对于那些不是毕生研究数学、构造数学、整天沉浸在数学思想的世界里的人而言可能并不是那么显而易见……

数学不是关于回答数学问题的艺术——大多数数学问题并没有答案，或者只有丑陋、凌乱而无趣的答案。相反，数学是关于提出正确问题的艺术，那些会有漂亮、给人启示而富有建设性的答案的问题。

数学也不是一个实用工具，一种获得答案的方法。要想那样，你使用机器，使用计算机就好了！数学是一种艺术形式，一种获得理解 的方法！数学证明的目的不是要确立什么是真的，而是要告诉我们它为何为真，让我们能够理解发生了什么！

方法论上的说明说得差不多了！那么我的进化模型实际是如何工作的呢？下面对我试图解释的主要观点做了一个总结。

元生物学的核心思想

生命=不断随机进化的软件

单个软件有机体 A，是一个数学家！

生物创造性=数学创造性

A 的适应度=忙海狸问题=输出的大小

命名大数：N , $N+N$, $N\times N$, N^N ,$N^{N^{N\cdots}}$

进化=爬山随机漫步A , A' , A'' , ...

算法突变$A'=M_1(A)$, $A''=M_2(A')$, ...

K 比特的算法突变的概率$M=2^{-K}$

非算法的oracle消除不良突变M

A 的适应度比任何可计算函数增长得都快！

因此，进化是创造性的，不是机械的！

现在，我们就提出关于进化的玩具模型。

其中核心的数学思想是：我们的有机体是数学家，我们将数学创造性等同于生物创造性。我们的模型足够抽象，使得数学创造性与生物创造性之间没什么本质区别。

为保持我们有机体的进化，避免它们停滞不前，避免不动点，我们需要给它们提出挑战，我们需要给它们一些困难的事情去做，一些需要花费无穷数学创造性的事情。为此，我们借助了哥德尔不完全性定理（1931），用其与著名的图灵停机问题（1936）相关的一种形式，即忙海狸问题，这个问题要求命名非常大的整数，非常大的无符号整数。

忙海狸问题是由蒂博尔·劳多在他六十多岁时提出的，对此的描述可参见我与牛顿·达·科斯塔、弗朗西斯·多利亚合著的《哥德尔之路》（*Gödel's Way* ）。原始参考文献是：Tibor Radó, “On Non-Computable Functions,” *Bell System Technical Journal* 41 (May 1962), pp. 877–884.

以非技术的方式再次重申一下前面的要点，我们借鉴了费耶阿本德在《反对方法》中的洞见：在科学中，不存在绝对通用的方法（这在数学上意味着一个定理），希尔伯特的梦想被哥德尔（1931）和图灵（1936）所击碎。正如费耶阿本德所指出的，不存在通用的方法，因

此，创造性始终是必需的；不存在做科学的机械的方法，因此，进化也不会停滞不前！

我的模型排除了实体，排除了身体，使得数学公式简单到能让我们理解正在发生的事情，并证明定理。另外，我不考虑生命的起源，我从一个具有完全功能的生物出发，并使它永远进化下去。我也排除了种群和性别，我只有单个有机体！然而，它进化了！你并不需要太多东西就能实现进化 ！ 这很好，因为这意味着进化是非常基础的，非常鲁棒的！

现在我们要开始面对我们关于进化的元生物学模型的数学核心。这有些技术性，也有点难度。我们将要攀登一座陡峭的山峰，但我会尽量用文字解释清楚这一切，而不仅仅只是公式。不过，如果你有不明白之处，请直接跳过，并继续向上，继续往前。你只需要看全貌，并尽量从整体上了解我所做的就好。

所以我们有单个软件有机体，它是一个计算机程序 A 。我们感兴趣的是 A 能计算出多大的数。数字越大，A 的适应度越好。我们要在 A 中做随机变化，而且每次只有一个有机体 A ，因此 A 描述了所谓的软件空间中的随机漫步。软件空间是包含所有可能的软件有机体、所有可能的程序 A 的空间。

想想一个醉汉摇摇晃晃地到处走动，随机漫步因而有一个更形象的名字，醉汉漫步。但我们的有机体 A 并非醉汉，它们是专注于努力解决忙海狸问题的数学家，忙海狸问题是一个计算非常非常大整数的问题。

从技术上讲，我们正在寻找一种特殊的随机漫步，即“爬山”随机漫步。为什么这样讲？因为我们并不是完全随机地晃荡，而是要求适应度不断增加。我们尝试随机变异的有机体 A ，直到它最终计算出一个更大的数。美国种群遗传学家休厄尔·赖特为这个过程起了一个更形象的名字：他使用所谓的适应度景观（fitness landscape）来描述它。如果你把每个可能有机体的适应度看做一个整体，那么我们希望看到，其中的趋势总是往上升的，这个策略常见于许多优化算法中。

我们的爬山随机漫步是这样工作的：我们尝试一个随机突变，用它来改变我们目前的有机体。如果所得到的有机体计算出了更大的数，也就是说，它更适应，则用它替换当前的有机体。否则，我们继续使用当前的有机体，并尝试另一个随机突变，如此循环往复。这里的关键问题是：适应度（=所计算出的数大小）的增长速率如何？

这就是我们的随机漫步，其中只有一个不断突变的有机体。但这还不算完。我还必须告诉你如何选择突变，以什么概率。

要想使元生物学在数学上成立，至关重要的一步是需要做到允许算法突变：如果突变 M 是一个 K 比特的程序，它以原来的有机体 A 作为输入，并以突变有机体$A' = M(A)$为输出，那么这种突变 M 的概率便是2^{-K}。换句话说，如果 M 是一个 K 比特的函数，它能够用 K 比特来描述一种变换，那么它具有概率$1/2^K$。

并且在我们的随机漫步模型中，有一个与距离相关的概念，由比特来度量。如果随机漫步让有机体 A 单步突变为有机体 B 的概率为$1/2^K$，那么 A 与 B 之间的距离即为 K 比特。更形式化的说法是，有机体 A 与有机体 B 之间的突变距离定义为：

$$-\log_2 \text{（从 } A \text{ 到 } B \text{ 的单步突变的概率）}$$

事实上，这也是以 A 为输入、以 B 为输出的最小程序 M 的大小。这在我以前的研究领域，算法信息论中，被称为使得 $B = M(A)$的最简函数 M 的程序大小复杂性，也被称为 B 相对于 A 的相对信息量。我之所以在此提及这一点，是因为定义突变距离的概率方式与程序大小方式是等价的，这一点也是我1975年在《美国计算机协会（ACM）会刊》上所发表论文得出的主要定理。正是在这篇论文中，我首次给出了算法信息论的全面表述。

换句话说，突变距离是指从 A 走到 B，或从 A 生成 B，或将 A 变换成 B 所需的算法信息量。而且请注意，通过单步从 A 生成 B 总是可能的。换言之，突变距离总是有限的，从 A 到 B 的单步突变概率始终大于零。

现在我要说说oracle。在我们的模型中，它是所有创造性的真正源泉。你可能会问“什么是oracle”。的确，它有点隐蔽，但它确实存在于我刚才所描述的模型中。

首先我要告诉你oracle是什么。它是源于阿兰·图灵的另一个有趣想法，但并不是在他著名的1936年论文中，而是出现于一篇鲜为人知的1939年论文。oracle是能让我们计算由普通计算机不能计算的东西的一种方法。特别是，它能为我们提供一种判定计算机程序是否停机的方法。这就是所谓的“停机问题的oracle。”

换句话说，它是一个数学想象。我们想象出了比实际计算机更强大的计算机。

那么为什么我们在停机问题中需要一个oracle？

我们需要它来避免无效的有机体和无效的突变。所谓无效的有机体，就是那些从不产生整数的有机体；所谓无效的突变，就是当给定一个 A，从不产生一个突变的有机体 $B = M(A)$ 的突变 M。没有算法能做到这一点（因为这是图灵的不可判定的停机问题），所以我们需要一个oracle告诉我们如何跳过一个从不停机的突变或有机体。

以上这些是游戏规则，说明我们的爬山随机漫步在软件空间中是如何运作的。但它的进化速度如何？

对此，我们将使用所谓的忙海狸函数（Busy Beaver function）来度量生物创造性的速率=进化速度。BB(N)定义为可以通过 N 比特命名的最大整数=由能输出单个整数并停机的任何小于等于 N 比特的程序所能产生的最大整数输出=我们最适应的小于等于 N 比特的软件有机体的适应度。

换句话说，我们想看看适应度的增长速率如何。而事实证明，它的增长速率非常快。为了进行比较，我们需要使用一些众所周知的、增长很快的函数作为基准。正如蒂博尔·劳多注意到的，BB(N)的增长速率比任何 N 的可计算函数都快，快过比如 N 的 N 次方的 N 次方的……它最终将超过任何可计算函数。从这一点来看，它永远是更大的。我们将使用BB(N)来刻画我们进化模型中的生物创造性的速率。

为什么要如此强调创造性？为什么创造性如此重要？因为你的寄生物、竞争者或捕食者也在进化！这是一场军备竞赛。这也就是利·范·瓦伦（Leigh Van Valen）的红皇后假说：你必须竭尽全力不停地跑，才能使你保持在原地（为了发表这篇论文，他只好自己创办了一个新期刊）！基因不像道金斯在他的《自私的基因》中所声称的那般自私，它们只是想进化！这是性的原因，而这绝不自私：通过性，你立马扔掉基因组的一半！你会把放弃自己一半财产的人称做自私？性并不自私，它改善了创造性。

除了为发表那篇著名论文而创办一个新期刊，逝世于2010年的范·瓦伦在生前也拒绝接受研究经费（以便保持他的自由和创造性），并给那些

与他意见不同的学生以高分！他是真正地在推崇创造性啊！

范·瓦伦的红皇后假说解释了为什么在地球的生物圈中存在如此之多的创造性。但在我的元生物学模型中，创造性是基于游戏规则自发涌现的：没有寄生物、竞争者或捕食者，一次只有单个有机体。

关于大自然旺盛的创造性，当然你也可以看看恩斯特·黑克尔精彩的生物艺术书籍。我们在每章的开头一直在展示他的作品。

但我确实认可道金斯把重点放在基因上的做法。谁在乎身体？！这也是梅纳德·史密斯分析生命后得出的观点：火焰有代谢，能自我复制，但它们不能进化。生命是一个拥有遗传和基因突变、通过自然选择能够进化的系统。火焰没有遗传——它们不传递遗传信息，它们并不记得自己是如何开始的，因而它们不能进化。这对我们而言无疑是件幸事，否则我们就会被巨大的掠食性智能火焰所吞噬！与火焰正好相反，我的有机体没有身体和代谢，但有DNA。

接下去我们将讲到故事的高潮部分，因为我们现在要比较三个极其不同的进化策略：无脑的穷举搜索、累积的随机进化，以及我称之为的“智能设计”。

你看，为了对达尔文进化论在我们的忙海狸模型中运作得有多好有个概念，我们需要为它找到上界和下界。这样，我们就可以看到随机进化实际上是多么智能，多么有创造性。

从数学上看：

- 智能设计（它做的是最佳的可能，以最佳的而非随机的方式选择后续突变），在 N 时间内到达BB(N)；
- 无脑的穷举搜索（它随机尝试所有可能的有机体，也就是说，每次都不考虑以前出现过的有机体），在2^N时间内到达BB(N)；
- 累积的随机进化（真正的达尔文主义的进化，它随机尝试所有可能的算法突变），在N^2到N^3之间的时间到达BB(N)。

所以你看，累积的随机进化比无脑的穷举搜索更接近智能设计，N^2和N^3比2^N更接近于 N。这就是我们的核心命题，我们的主要或基本定理。

因此，我们宣称我们的模型在进化，我们的模型是活的。

到这里，一个纯数学家就会骄傲地宣布，QED（证毕）。随机性即创造性！随机突变和自然选择实现了同一种智能！智能是自发涌现的！

前面我谈到了时间。但在我的模型中，时间是如何度量的呢？其实

时间=所尝试的突变数量=在随机漫步中尝试的步数

当然，并非所有的这些突变都是成功的，但我们仍将它们都算上。

那么这一切具体是如何运作的呢？我如何证明这些估算？在我们的忙海狸进化模型中，事实证明，不断进化的有机体是对停机概率Ω越来越好的逼近（实际上，是越来越好的下界），因为这些都是最适应的有机体。智能设计在 N 时间内获得Ω的 N 比特，这是最佳的可能；尝试所有可能的穷举搜索在2^N时间内获得Ω的 N 比特；累积的随机进化则在N^2到N^3之间的时间获得Ω的 N 比特。

还记得在上一章我说过，Ω是浓缩的数学创造性吗？因此，换句话说，我们分别在 N 时间中获得了 N 比特的创造性、在2^N时间中获得了 N 比特的创造性，以及在N^2到N^3之间的时间获得了 N 比特的创造性。

我在这里就不再解释这个证明，我会在下一章中进一步解释，那是我在桑塔费研究所做的讲座。有数学或物理背景的读者也可以看一看本书最后的附录二，其中提供了一些额外的细节。

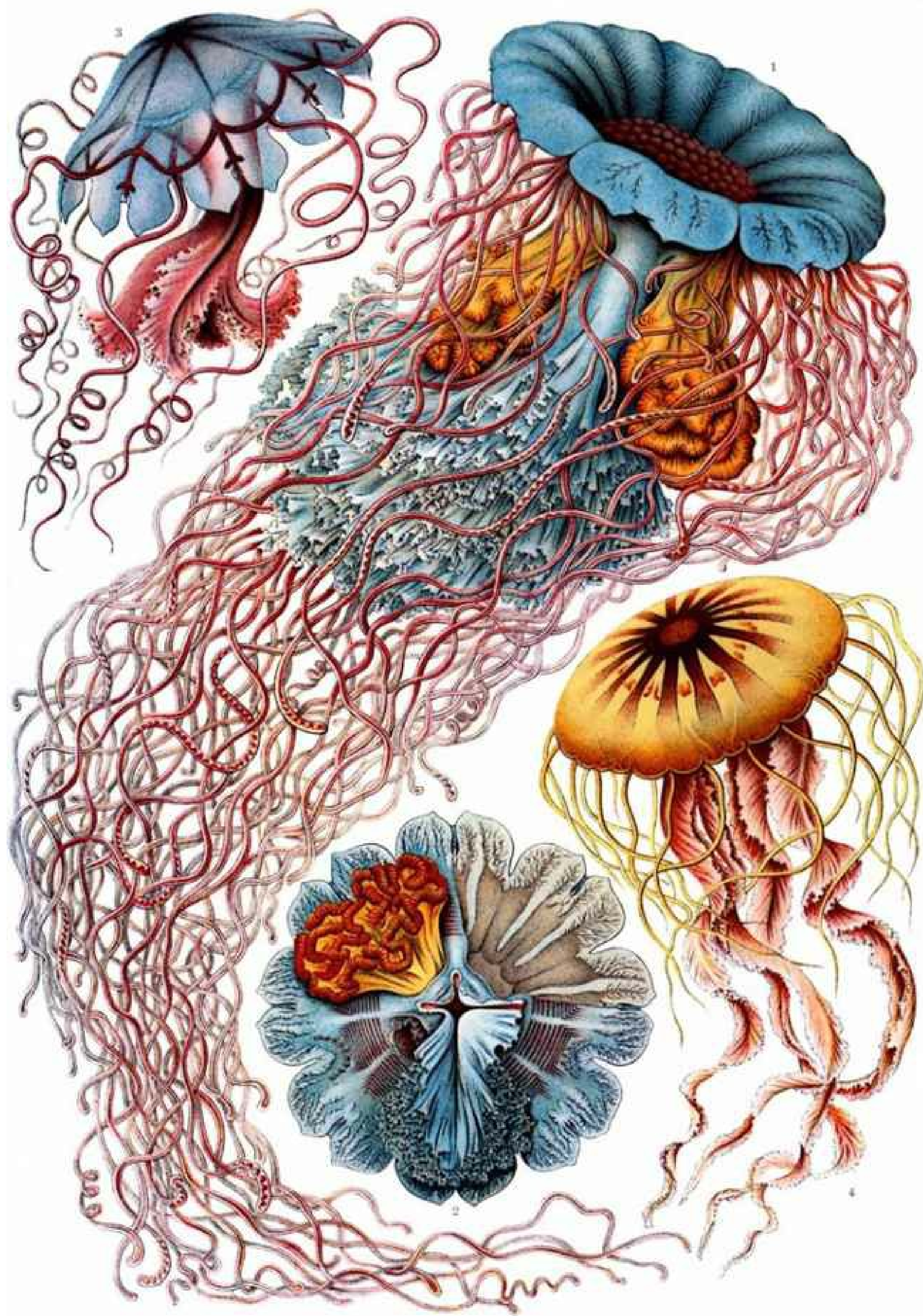
对于非数学家而言，这三个估算可能看上去没什么特别。但我为此努力了将近四十年（从1969年算起，可以看一看我发表的涉及生物学的一长串论文），我一直试图在这样的数学一般性层次发现研究进化的方法，而且我连一垒都还没有达到。这确实没什么了不起，它只是迈向关于进化和生物创造性的一个抽象和一般的数学理论的第一步，然而往往万事开头难。困难的是提出一套直指问题的本质且在数学上可解的概念。

所以我对此满怀期望。确实，在一开始，我都有点心花怒放，但现在主要的感觉是谨慎的希望。时间会说明一切。我承认，这些结果甚至对我而言似乎都有点奇怪，毕竟这是一个崭新的领域。我们需要一段时间才能搞清楚，我们究竟是被误导了，还是里面真的存在一些东西。我认为，某种不断进化的软件的模型应该会有所帮助。

最后说一下我在桑塔费研究所的演讲。这么说吧，那应该算是元生物学的全球首发。让我先作一番铺垫。那块场地激动人心。桑塔费研究所，其禅宗寺院状的建筑坐落在海拔两千多米的新墨西哥州沙漠，前边视线开阔，一望无垠，后边背靠群山，山上白雪茫茫，在阳光下熠熠生辉。听众也是非常理想的：一组精心挑选的、热衷于复杂系统的物理学家、数学家和计算机科学家。下一章就是我给他们所做的讲座——顺便一提，这是在几个月前的事情，那时我还没有发现梅纳德·史密斯那本在1986年出版的《生物学诸问题》一书。

第五章　桑塔费研究所的讲座：关于进化和生物创造性的一个数学理论 *

* 讲座在吉姆·克拉奇菲尔德和乔恩·马克塔组织的“随机性、结构和因果关系：复杂性的度量，从理论到应用”研讨会（桑塔费研究所，2011年1月10日星期一）上给出。黑体文字是当时写在黑板上的文字。



水母

我要在此感谢主办方的盛情邀请。我已经有很多年没访问桑塔费研究所了。我很高兴能回来，同时我有一些全新的东西想分享一下。我觉得将理论计算机科学与生物学结合，同时提出一种理论数理生物学的时机已经成熟。

理论生物学

数理生物学

我相信我们已经拥有了发展这样一种理论的数学工具。

多年来，我一直认为，我们不能从数学上证明达尔文进化论，这是数学的一个耻辱。我想找到最简单的关于进化的玩具模型，并通过它证明进化将永不停息。我要强调的是生物创造性，这在达尔文进化论的标准表述中是缺失的。

我很清楚，现在关于生物学和进化的文献汗牛充栋（它们做得不错，我无意否认这一点），但我会忽略其中的大部分，而选择一个不同的方向。所以还请大家少安毋躁。

现在有一个很好的关于进化的数学理论，即种群遗传学。但根据定义，种群遗传学中是不存在创造性的，因为种群遗传学将进化定义为基因为响应自然选择压力而发生的频率变化，同时它处理的是固定的、有限的基因池。相反，我感兴趣的是新基因从何而来，创造性如何发生。

另一种解释我的动机的方式是：上个世纪的领先技术是基于数字软件、计算机编程语言，而这个新世纪的领先技术将是生物技术，它是基于自然数字软件，即DNA。

人工数字软件：编程语言

自然数字软件：**DNA**

这两种技术将融合。人们说“计算机病毒”，说“网络战”，说“开发免疫系统以保护网络资产”，这些都并非偶然。而我要说的是，这不仅是一个比喻。我们可以利用这个类比来发展关于进化的一个数学理论。

达尔文在《物种起源》的开头将自然选择与人工选择相类比。人工选择来自动物和植物育种家，来自他那富裕的邻居培育出冠军产奶母牛、赛

马和玫瑰的成功努力，而自然选择则是由于马尔萨斯限制。在此，我也要利用自然软件（DNA）与人工软件（计算机程序）在随机进化上的相似性。我把这个新领域称为“元生物学”，它研究软件空间中的随机漫步，一种增加适应度的爬山随机漫步。

不断突变的软件的进化

软件空间中的随机漫步

随机漫步是一个数学家熟悉的概念。关于随机漫步的文献也为数众多。在此，我将提出一个在更广阔的空间中的随机漫步，这个空间是一个给定计算机编程语言的所有可能程序的空间，它巨大到足以为生物创造性建模。

所以我基本上是从两个观察入手的。首先，DNA大概是计算机科学家所谓的“通用编程语言”，这意味着它足够强大，足以表达任何算法——进化发育生物学尤其会让我们把DNA想象为计算机程序。其次，在我的模型所运作的抽象层次，数学创造性与生物创造性之间没有本质区别，所以我可以使用那些不存在通用方法的数学问题来挑战我的有机体，迫使它们持续进化。

DNA=通用编程语言

数学创造性=生物创造性

埃米尔·波斯特，他是一位被人们遗忘但事实上与哥德尔、图灵处于同一层次的数学家。他认为不完全性和不可计算性表明了，创造性对数学而言不可或缺。长久以来，由计算机所引发的对形式化方法的重视暂时掩盖了波斯特的洞见，但元生物学现在重新接过了创造性的火炬。

重申一下，这里的基本思想是，我们都是程序空间中的随机漫步！我们的基因组都是数字软件，为了应对环境变化被修补和修改了数十亿年。事实上，我认为应当将生命看做不断进化的软件，并把生物学看成一种软件考古学。所以不是拉·梅特里说的《人是机器》（1748），我们现在要说“人是软件”。

更具体而言，我正在研究这样一个关于进化的玩具模型。我有单个有机体，然后我尝试对其进行随机突变。如果生成的有机体更适应，那么它

将取代原来的有机体。

现在让我更详细地解释一下。

我的有机体是什么？在理查德·道金斯的著作《自私的基因》中，他告诉我们，身体并不重要，它们只是基因的载体。所以我抛弃了身体，只保留DNA。

另一种更好地解释这一点的方式是，提起大家注意约翰·梅纳德·史密斯和厄尔什·绍特马里在《进化的重大转变》和《生命的起源》两书中对生命的定义。他们讨论了生命的两个定义。一个定义相当显而易见。生命体通过摄取和排泄物质来维持其结构。换句话说，它有新陈代谢。此外，它可以自我复制。尽管这似乎是一个很自然的定义，但梅纳德·史密斯和绍特马里指出，火焰也满足这个定义。

然而，火焰并没有遗传，火焰不记得自己是被火柴还是被打火机所点燃的，因而它们也并不进化。

因此，梅纳德·史密斯和绍特马里提出了一个更复杂的生命定义。当你有可突变的遗传，同时通过自然选择可以进化时，你便拥有生命。

这似乎是一种同义反复。不过，达尔文理论也似乎是一种同义反复（“适者生存”不过是“生存者生存”），但自然选择并非同义反复。生命的定义也不是，因为这里的关键是，要证明存在满足该定义的东西。问题的关键是要找到能够遗传和突变的最简单系统，并证明它能够进化。

因此，为了使事情尽可能简单，没有新陈代谢，没有身体，只有DNA。我的有机体将是计算机程序。接下去，我还要解释一下我是如何进行突变的，以及我的所谓适应度是什么。

两年来，我研究元生物学所用的一直是生物学家所称的点突变：你在你的计算机程序中更改/删除/增加一个或多个连续的比特，这时突变的概率随着改变的比特数量增加而呈指数下降。使用这种方式，通过单步实现从有机体A到有机体B突变的概率为非零，但如果A的全部比特都被改变，那这个概率将是无穷小。

使用点突变，我得以能够开始工作，事情也似乎开始有了些眉目，但很快前进的道路被阻断了。事情变得难以处理，数学中的开创性工作常常

会是如此。然后就在几个月前，也就是去年夏天的七八月时，我有了一个突破。

我意识到，从数学的角度，应该考虑的是算法突变，这时的突变是指一个计算机程序：输入初始有机体 A ，产生突变有机体 B 作为其输出。如果这个算法突变是 K 比特程序，那么从 A 突变为 B 的概率为2^{-K} 。

$$K \text{ 比特算法突变 } A \rightarrow B \text{ 的概率为} 2^{-K}$$

如果我们使用算法信息论中的无前缀编程语言，那么所有程序的概率总和将小于1。这样，我们可以得到一种所谓的“归一化度量”，这个技术相信大家都不陌生。

那么现在，又有了一个从有机体 A 单步突变到有机体 B 的非零概率，但这种概率与点突变的概率有很大的不同。例如，考虑翻转程序 A 的每一个比特的突变，这种突变在点突变中虽然可能，但可能性微乎其微。而在算法突变中，它所需的算法非常简单，因而是个极有可能发生的突变。

如果突变是随机选择的，每一个突变会被无限次尝试，那么这种位翻转突变将会非常频繁，实际上会有一个固定的比例。

顺便说一句，使用算法突变，突变程序有可能永不停机，永不输出突变有机体 B 。所以你实际上并不能模拟我的进化模型，因为要想做到这一点，你需要使用计算机科学家所说的停机问题oracle（沿用图灵的说法）。后面在判定突变有机体 B 是否比原来的有机体更适应时，我们将再次需要用到oracle。如何才能做到这一点呢？我的适应度与适应标准又是什么呢？

为了让我的生物永远进化，我需要让它们挑战一个永远不能完美解决、需要无穷的数学创造性的数学问题。我的有机体是数学家，它们试图变得越来越好，想要知道得越来越多。那么我们应该使用什么数学问题来迫使它们进化呢？

最简单而又极具挑战性的问题是忙海狸问题，这与图灵著名的停机问题密切相关。什么是忙海狸问题？这个问题要求简洁地命名一个非常大的正整数，一个非常大的无符号整数。

为什么这需要创造性？假设你有一个大数 N，你想要命名一个更大的数。你可以从 N 得到 $N+N$，N 乘以 N，N 的 N 次方，N 的 N 次方的 N 次方……因此，为了命名大数，你必须发明加法、乘法、幂运算、超幂等，而这些都需要创造性。

忙海狸问题：$N+N, N^2, N^N, N^{N^{N\cdots}}$

在网络上有一篇由量子计算复杂性理论家斯科特·阿伦森（Scott Aaronson）撰写的优美文章，《谁能命名最大数？》。我强烈推荐这篇文章，它解释了忙海狸问题是一个非常根本性的问题。

所以这就是我的适应度。我的每一个软件有机体计算出一个数，一个正整数。数字越大，则有机体越适应。当前的有机体 A 有一个特定的适应度 N，然后我们根据前面解释过的概率测度，尝试随机突变。如果产生的有机体 B 计算出一个更大的数，那么它就会取代 A。否则，我们尝试再次突变 A。

请再次注意，我们正隐含地使用了一个oracle，因为随机突变 A 往往会产生一个永不停机、计算不出任何数的 B。因此，我们不能仅仅通过运行 B 来判定 B 是否比 A 更适应（即 B 产生的数是否比 A 产生的大）。我们需要跳过那些产生一个无效程序 B 以及永远不会产生一个突变有机体 B 的那些突变。

为了度量进化速度，度量生物创造性的量以及生物创造性的速率，我们使用了所谓忙海狸函数BB(N)，它被定义为使用不超过 N 比特的程序能够命名的最大正整数。［这是忙海狸函数的一个改进版。最初的忙海狸函数BB(N)是由一个不超过 N 个状态的图灵机所能计算的最大整数。］

BB(N)=使用不超过 N 比特的程序能够命名的最大正整数

BB(N)的增长速率比 N 的任何可计算函数都更快，因为BB(N)本质上等同于任何最终会停机的不超过 N 比特的程序的最长运行时间。所以要是BB(N)可计算的话，我们就有办法解决停机问题了。

好吧，现在让我们看看我们从一个小的有机体，例如一个计算出数1的有机体开始，看看这个爬山随机漫步会发生什么。我们采用随机突变，看适应度的增长速率如何。事实上，为了评估这种累积的随机进化的进化速度，我们可以看看它处于下面这个区间中的何处。

- 无脑的穷举搜索 。在这种搜索中，以前的有机体 A 被忽略，我们完全随机尝试一种新的有机体 B （换句话说，突变是由随机选择的程序所生成的，没有任何输入）；

- 最快可能的进化，以最佳可能的方式选择一系列突变，以使适应度增长最快，我把这称为“智能设计 ”。

  ［你不能使用oracle来直接跳至BB(N)，BB(N+1)等，因为我们对oracle的使用是严格受限的，它只用于判定 $A \rightarrow B$ 是否比 A 更适应，以及消除从 A 中不产生 B 的那些突变］

这里的设计者不是神，他是找到了最佳可能的突变序列的数学家。

下面是这三种不同的进化策略的结果：

穷举搜索在$\approx 2^N$时间达到适应性**BB(N)**

智能设计在 N 时间达到适应性**BB(N)**

累积的随机进化在N^2到N^3之间的时间达到适应性**BB(N)**

我的时间单位是所尝试的突变数量。例如，我可以每秒尝试一次突变。注意，适应度比时间的任何可计算函数增加得都快，这表明真正的创造性正在发生。如果有机体是被机械地或算法地改进，那么适应度只会按照时间的可计算函数增长。当然，创造性实际上来自隐含地使用了oracle：我们每一次尝试突变，都会被告知，所产生的 B 是否比原来的有机体 A 更适应，我们因此得到了至多1比特的创造性，从BB(N)前进到BB(N+1)（这是我们所能做到的最佳情形，而这正是智能设计所实现的）。

穷举搜索为了达到BB(N)花费的时间是 N 的指数，因为穷举搜索是遍历的，它搜索可能有机体的整个空间。那绝不是现实进化的过程：人类基因组有3×10^9 个碱基，但在40亿年的时间里，生物界只能够尝试$4^{3\times10^9}$这个天文数字的无穷小部分，这个数字是所有可能的DNA序列。进化绝对不是遍历的。

请注意，在我们的玩具模型中，累积的随机进化比穷举搜索速度更快，而且相当地接近智能设计。这是怎么回事？其实，在这个随机进化模型

中，我们的进化是知道了停机概率Ω越来越好的下界。知道停机概率Ω的 N 位数值本质上就等同于知道BB(N)。快速增加适应性的随机突变 M_K 获得Ω的一个下界，并看它是否可以从小数点后第 K 位推进到第$K+1$位。换句话说，M_K 尝试查看如果增加2^{-K}，Ω的当前下界是否仍然是一个下界。

$$M_K\text{：我们能添加}2^{-K}\text{到我们的}\Omega\text{下界？}$$

如果是这样，我们增加2^{-K}到Ω的当前下界。如果不是，我们随机尝试另一个 K 比特的突变。智能设计会系统地尝试 M_K （$K=1, 2, 3,\ldots$）。累积的随机进化慢得不太多，因为突变M_K 本质上只需要命名 K，而这可以由$\log K+2\log\log K$ 比特的无前缀/自定界软件算得，因而M_K 具有概率$\geq 1/K(\log K)^2$，并且预计会在$\leq K(\log K)^2$ 的时间里发生。所以累积的随机进化尝试从Ω的第$K=1$位推进到第 N 位所需的时间大致为

$$\Sigma_{K\leq N} K(\log K)^2 \leq N^2 \text{到} N^3 \text{之间}$$

这就是证明达尔文进化论在我的模型中有效的大致过程。有关详情请参阅附录二或者我的奥克兰大学离散数学与理论计算机科学中心研究报告（CDMTCS-391），后者可从以下网址获得：

http://www.cs.auckland.ac.nz/CDMTCS//researchreports/391greg.pdf

我承认，这个结果似乎有些奇怪，甚至对我而言也是如此。但我认为这是迈向元生物学方向的第一步。这是我能想到的、能证明进化的最简单模型。这是我从达尔文理论中抽取其数学本质的一次尝试。但出乎我意料的是，在这个模型中，快速进化的有机体是停机概率Ω越来越好的下界，可以说，Ω也在进化。事实上，所有可能的通用图灵机的停机概率都在并行地快速进化；其实存在多个停机概率，不只是一个。我们将在大概从 N 的平方到 N 的立方之间的时间里，知道每一个Ω的 N 位数值。

为什么Ω在进化？因为达尔文理论的要义之一是，进化来自于积累有利的每一个微小变化。达尔文清楚，半只眼睛是毫无用处的，因此中间形态的缺失让他感到非常忧心。所以在《物种起源》的“论地质记录的不完全”一章中，他试图对此给出解释。但Ω中塞满了有用的数学信息，而

我们一次只可以了解其数值中的一位。因此，通过积累微小但有利的变化，Ω的下界越来越好，这给了我们一个非常可能的进化路径。

正如我先前说过的，每个突变都被无限次尝试，有些还相当频繁。那么有可能存在一个突变，让一个没有做任何计算就直接输出$N+1$的程序取代适应度为 N 的有机体。这无疑是一个非常愚蠢的有机体，但它增加了适应度，所以这种突变每次尝试，每次都会成功。面对如此剧烈的扰动，随机进化如何能实现呢？其实，这是因为这个系统的记忆存在于适应度当中，而后者总是在增加的。知道一个非常大的整数 N，使我们能够计算出Ω的一个很好的下界。只要看看所有小于等于于 N 比特的程序，并在时间 N 内运行它们，看看哪些会停机，这就会让我们得到Ω越来越好的下界。

这就是我发现柏拉图式的进化思想的最佳尝试，也是展现创造性的最简单、最自然的系统，通过它，我能够证明通过随机自然选择实现进化。我们得到了可证明的进化，这是非常好的第一步，我想这也验证了元生物学是一个具有可行性的研究项目。但我们在这种有机体中没有得到层次结构的增长（它们本质上只是Ω的下界），而层次结构是自然有机体一个非常显著的特征。

那层次结构呢？

其实除了我刚才解释的那个模型，我还研究过另外两个关于进化的玩具模型。这些模型的不同之处在于所用的适应度度量以及编程语言。在我的第二个模型中，我使用了所谓“子递归”编程语言，它不是通用编程语言，因此也没有停机问题。之所以没有停机问题，是因为这是一种类似FORTRAN的语言，当你输入一个循环的时候，你事先知道它要执行的次数。

现在每个程序计算一个函数，而不是一个整数。函数增长得越快，程序的适应度就越好。

$$\boldsymbol{N+N \rightarrow N^{2} \rightarrow N^{N} \rightarrow N^{N^{N\cdots}}}$$

我们对子递归层次结构已经有了很多了解［（可参见比如由我的朋友克里斯蒂安·卡卢德（Cristian Calude）编写的《计算复杂性理论》］，从中我们很容易得出，程序的循环嵌套级别必定会无所限制地增加。这样，我的另一个关于进化的玩具模型可以证明其中必会出现层次结构。

在我的第三个关于进化的玩具模型中，再次采用通用编程语言，而非子递归编程语言，而每个程序要做的是命名所谓“构造性的康托尔序数”。下面是这些数的一些例子：

$$\mathbf{1, 2, 3, \omega, \omega+1, \omega+2, 2\omega, 3\omega, \omega^2, \omega^3, \omega^{\omega}, \omega^{\omega^{\omega}}, \varepsilon_0, \ldots}$$

在这个模型中，我认为，穷举搜索是你能采用的最好策略。一般情况下，对于任意适应度景观，你都会期望用到穷举搜索，而累积的随机进化不可行。要想证明达尔文进化论在其中有效，那么适应度景观必须很特别。

那么，这对元生物学意味着什么？我认为，存在一系列可能的随机进化程序，其中更现实的模型会限制程序的运行时间，从而可以避免引入oracle。我相信，对于模型来说，在生物学现实性与我们可借此证明的东西之间存在权衡：模型越逼真，我们就越要依靠计算机模拟，而不是证明。

存在更现实的模型吗？

对此，存在许多可能的未来研究方向。除了限制运行时间，还可以尝试涵盖种群和性别。仍有许多工作要做，但无论如何，人们不应该指望这个理论数理生物学会如同理论物理学那般现实。生物学实在是太复杂了，与数学已经相去甚远。虽然元生物学在数学上很有前景，但元生物学与真正的生物学的相关程度还有待观察。正如我妻子弗吉尼亚·蔡汀所指出的，元生物学已经为真正的生物学家提出了一个有趣的问题，即在实际有机体中，突变机制到底有多强大？实际有机体到底有多接近我的元生物学模型运作所需的那种强大的算法突变？

［事实上，毛里西奥·阿夫达利亚（Maurício Abdalla）和马克西莫·桑丁（Máximo Sandín）的研究让我感到，这种算法突变可能确实存在：它们就是病毒！］

关于元生物学另一个需要注意的地方是，它并没有研究生命的起源，也没有涉及如果我们开始掌握自己的生物命运，例如进行基因工程或者使用设计基因组（用钱能买到的最好的基因）生产孩子，那将会发生什么的问题。

最后，我想用几个与生物创造性和进化相关的一般性讨论来结束我的演

讲。

传统的观点认为，进化并不是永不停息的，在你完全适应你的环境后，你就会停止进化。人们还认为，进化不一定都是进步的。到目前为止，人们在生物学和经济学中所建立的简单数学模型主要考虑的是稳态和不动点，他们并不谈论创造性。

然而，这不是思考生物学的正确方式。在生物学上，没有什么是静止的，一切都是动态的。病毒、细菌和寄生物都在不断变异，不断尝试各种组合可能性，不断探索突破你的抵抗力的更好方式。生物学是无休止的创新，根本就没有稳态。这是一场军备竞赛，正如刘易斯·卡罗尔笔下的红皇后所说的，你必须使劲跑，才能维持在原地不动。

（对于大自然旺盛创造性的美轮美奂的视觉呈现，可参见恩斯特·黑克尔精彩的《海洋的艺术形式》和《大自然的艺术形式》。）

这一点在所谓性悖论中得到了很好的体现，对该悖论的长篇讨论可参见道金斯《祖先的故事》中的“轮虫的故事”一章。在达尔文进化论的标准视角中，性是有问题的，因为所谓自私的基因只是想自我复制。但通过性，你立马丢掉了你的一半基因组，你会认为一个放弃了其一半财产的人是自私的?！除了极少数单性物种，性几乎是普遍存在的。那怎么会这样？

为什么会存在性？

原因就是，生物实际上是创造性的，是在不断改变的，没有什么是稳定的，就像在人类事务中一样，而性大大加速了这个创造性过程。如果需要获得几个必需的突变，通过性，需要花费的时间是它们随机出现所需时间的最大值；而对于单性物种而言，需要花费的时间是这些突变时间的加总，而不是其最大值。

总而言之，元生物学强调的是生物创造性，而非其自私性。它开辟了对于达尔文进化论的一个全新诠释。至于这条道路能走多远，我们还有待观察，但这第一步是令人鼓舞的。而且研究不断变异的软件的进化的数学工具也已经就位：理论计算机科学就是理论生物学。

参考文献

S. Aaronson, http://www.scottaaronson.com/writings/bignumbers.html .

C. Calude, *Theories of Computational Complexity* , Elsevier, 1987.

G. Chaitin, *Algorithmic Information Theory* , Cambridge University Press, 1987.

G. Chaitin, “Evolution of Mutating Software,” *EATCS Bulletin* 97 (February 2009), pp. 157–164.

G. Chaitin, “Metaphysics, Metamathematics and Metabiology,” *APA Newsletter on Philosophy and Computers* 10, No. 1 (Fall 2010), pp. 7–11. Also in H. Zenil, *Randomness Through Computation* , World Scientific, 2011, pp. 93–103.

G. Chaitin, http://www.cs.auckland.ac.nz/CDMTCS//researchreports/391greg.pdf . Also in H. Zenil, *A Computable Universe* , World Scientific, 2012.

C. Darwin, *On the Origin of Species* , John Murray, 1859.

R. Dawkins, *The Selfish Gene* , Oxford University Press, 1976.

R. Dawkins, *The Ancestor's Tale* , Houghton Mifflin, 2004.

E. Haeckel, *Art Forms from the Ocean* , Prestel, 2009.

E. Haeckel, *Art Forms in Nature* , Prestel, 2010.

J. O. de La Mettrie, *Man a Machine* , Open Court, 1912.

J. Maynard Smith and E. Szathmáry, *The Major Transitions in Evolution* , Oxford University Press, 1997.

J. Maynard Smith and E. Szathmáry, *The Origins of Life* , Oxford University Press, 1999.

第六章　元生物学的神学意涵

海葵



海葵

在前面的章节中，我们已经讨论了数学，但它到底意味着什么？假设它是正确的，那它又会对我们理解“人的境遇”有什么帮助？在最后三章中，我们就将讨论元生物学的神学、政治学以及认识论意涵。让我们先从神学说起……

首先，我要强调，元生物学并不是一种无神论。在我看来，尝试为生物学找到一个美丽的数学理论来源于一种宗教冲动：莱布尼茨的神学便认为，我们宇宙的规律一定是美丽的，因为世界是上帝创作的一个艺术品，而上帝是数学家（这是我的话，不是莱布尼茨的原话）。请记住，莱布尼茨创造了一个与现代科学和数学兼容的神学。正是在莱布尼茨和斯宾诺莎的意义上，我将元生物学视为一种宗教。我试图做到的是，从常规的科学和数学推导出一个可塑的世界。与莱布尼茨一样，我想鱼和熊掌，两者兼得。

人可以理解上帝吗？诺斯替主义者（gnosticism，源自于希腊语的“知识”一词）认为这是可能的，不可知论者则认为上帝是不可知的。莱布尼茨相信上帝可以通过无所不能的理性被理解，而其他人则认为上帝只能通过信仰而被接近，但永远也无法被理解。这个问题的现代版本是：人能够完全理解宇宙的规律吗？莱布尼茨对无所不能的理性的信念也延续到了现代，表现为这样一种学说：当某件事情被完全理解时，那它就能够用数学表达，并且一门科学越数学化，它所取得的进步就越大。

让我们来回顾一下莱布尼茨对简单性和复杂性的论述。在《形而上学论》（1686）的第五和第六部分中，莱布尼茨写到，如果生命是在上帝的干预下才出现的，那么那个世界是不够完美的。一个需要奇迹的世界比一个自行运行的世界较不完美，因为它更复杂，因为它不能从简单的自然基本规律中衍生一切。奇迹就像是宪法修正案，它们被加入国家的根本大法当中，结果大大增加了宪法的篇幅。这基本上是莱布尼茨和马勒伯朗士反对奇迹的说法。（参见：Steven Nadler, *The Best of All Possible Worlds: A Story of Philosophers, God, and Evil* , pp. 132–133. 也可参见：Matthew Stewart, *The Courtier and the Heretic: Leibniz, Spinoza, and the Fate of God in the Modern World* .）

作为一名数学工作者，我恐怕还没有形成一个内在一致且让我有信心为其辩护的哲学立场。但我相信这个世界是由数学构成的，宇宙的终极本体论基础是数学的，因为这是最坚硬、最尖锐、最有可能的具有静态、永恒和完美属性的实质。（毕竟这个世界必须是由某物构成的，而这显然不是棉花糖！）在这个意义上，我应该算是毕达哥拉斯主义者。在我

看来，这或多或少是现代理论物理学所采取的立场。

我想，我不同意柏拉图主义者的观点，即认为这个世界不过是思想世界的一个不完美版本。相反，在我看来，我们的世界是构建在柏拉图世界之上的。我不认为我是一个二元论者，我不相信存在一个独立于数学思想之外的另一个世界，一个没有我们的世界。在我看来，我们的物理世界只不过是数学思想世界的一个无穷小部分，后者包括所有可能的物理世界，包括一切的存在，一切的实在……不过，按照哥德尔的观 点，我们对完美世界的了解总是不完全的，总是局部的，并且总是不断 变化的。

在我的世界图景中，数学思想的柏拉图世界同时包含所有可能的物理世界和所有可能做数学的方式。本书的最后一章会论及数学的终极极限。在那一章的开始部分，我说，数学是不断进化的。那是我们的数学，是人类的数学，是小写的数学（mathematics）。而大写的数学（Mathematics），按照柏拉图的观点，我想是静态、永恒和完美的。

试比较马克斯·泰格马克的观点。（参见：M. Tegmark, “Parallel Universes,” in J. D. Barrow, P. C. W. Davies and C. L. Harper, *Science and Ultimate Reality: Quantum Theory, Cosmology and Complexity* , Cambridge University Press, 2004, pp. 459–491.）泰格马克提出了一种由所有可能的数学定律构成的多重世界论，其中每个数学定律“创造”了一个世界，或者与之相关联。

对上帝的信仰的最后残余是对美丽的科学理论的信仰。一个世纪以前，受过教育的人崇尚艺术、真与美——它们总是被大写。而现在，我们什么都不信仰，或许只信仰金钱。启蒙运动最终在归谬中终结。

重申一下，元生物学不是一种无神论。通过使生物学成为毕达哥拉斯主义的，元生物学将与理性，与真，与美站在一起，同时也将与莱布尼茨的上帝、斯宾诺莎的上帝以及爱因斯坦的上帝一道。

此外，元生物学所展现的自然图景不是机械的、还原论的，它不是一个封闭的希尔伯特式的形式系统。相反，自然世界，通过创建软件，变得是可塑的、创造性的和开放的，它的进化永不停息，它永远不会停滞。在这一点上，它与柏格森的《创造进化论》（1907）、萧伯纳的“生命力”（参见他的戏剧《人与超人》中的“唐璜在地狱”一幕）以及德勒兹的“流变”（devenir）相契合。

关于随机性的一点说明 ：达尔文用随机性取代了上帝。这看似很糟糕，但实际上随机性是创造性的、赋予自由的，它比一个机械的、确定性的世界更好，后者仅仅是一个巨大的囚牢。一个反复无常的上帝比一个可预测的乏味的上帝要好不知多少。而根据定义，创造性便是出人意料的，是反复无常的，也是不可预测的。

第七章　创造性的政治学（社会达尔文主义→社会元生物学）



兰花

根据元生物学的观点，生命的目的在于创新性，而非延续自己的基因。正如赫拉克利特所说的，万物皆流变，无物常驻。

不妨看一些富有极端和神秘性的创造性的例子：巴赫、莫扎特、欧拉、康托尔和拉马努金。

莱昂哈德·欧拉在他漫长的一生中每个星期都会写一篇优美的文章，通常是涉及不同的主题，甚至当他眼睛失明之后，依然如此。他的创造性似乎得来全不费工夫。他在文章里清晰地解释了他的整个思想轨迹；在阅读其文章时，你以为自己也能够做到如此，但这种幻觉也只持续在你阅读其文章的时候。他似乎直通创造性的源泉，对于他而言，创造性犹如滔滔江水，连出版商都跟不上其步伐……

格奥尔格·康托尔创造了某种数学神学，它是一种关于无限、超验的数学，是一种极限逼近上帝的尝试。他那不无悖论的理论正反映了一个有限的存在试图领悟无限时所遭遇的悖论，反映了人类在试图理解一个超验的上帝时的悖论。但尽管如此，他的理论发人深省，对20世纪的数学产生了深远影响，促进了一个更通用的集合论结构观的发展……

斯里尼瓦萨·拉马努金不是通过证明，而是通过某种无法解释的洞察力，获得了他那些非常美丽的结论。他声称，Namagiri女神会在他睡着的时候，在他的舌头上写下方程。此外，他还宣称，除非是表达了某位神灵的旨意，否则任何方程式都是毫无价值的……

所以吃这一拳，还原论者们！

我认为，我们应该以一个国家的创造性，以其产生的新的科学、艺术、技术或社会思想，而不是金钱，来衡量一个国家。如果一个国家要想最大化其创造性，那它应该做些什么呢？

请注意，费耶阿本德的《反对方法》实际上是一本关于政治学的书。由于社会施加了方法，它便也强加了僵化死板。而当一名科学家被嵌入僵化死板的社会中时，他是灵活不起来的……

当国家变得僵化死板，当它们的官僚主义盛行，当它们停滞不前，当它们变得不灵活，当它们过于只考虑自己时，国家就将灭亡。在某种意义上，繁荣也会成为一个问题。通过极大的努力，我们可以克服贫困，有所成就，但要想克服过度富裕，这几乎是不可能的。

此外，在我看来，人类不应该试图变得像机器，毕竟在这一点上，机器要大大优于我们。人类擅长的是创新，是尽可能地不像机器。

看看古希腊是多么有创造性，而稳定的古埃及是多么乏味。由于古希腊人被岛屿和山脉分割成城邦，这些城邦小到足以让每个人都有可能产生影响，而埃及的地理条件适宜对大片领土形成强大的中央控制，这就抑制了所有改变的可能。

或者再看看文艺复兴时期的意大利，如此具有创造性，也是如此被分割成公国和小公国。所以说我主张创造性的无政府状态和分散控制，想必你应该不会感到惊讶。

想当年，计算机技术源自于图灵试图确定希尔伯特的形式化公理理论的适用范围的探索，而可能出现的通用工厂则源自于冯·诺伊曼试图理解自我复制的努力。这些研究项目现在会被资助吗？在现行的资助政策下，没有明显的应用前景的长期基础研究能得到支持吗？

当迈克尔·法拉第（1791—1867）在被一个政治家问及电的发明有什么好处，电力有何用途时，他回答道："婴儿有什么用？有朝一日你可以从他身上征税！"

当卡尔·雅可比（1804—1851）在被问及他为什么从事纯数学研究时，他回答道："为人类精神的荣誉！"

可惜现在，得以资助和发表的只是那些安全的、渐进的"常规科学"（托马斯·库恩），而非范式转变。创造性正在被屠杀。

一个好的例子是利·范·瓦伦，红皇后假说的提出者。该假说解释了生物的创造性和性，但屡次投稿都被拒。为了保持他的研究自由，范·瓦伦拒绝申请研究经费。现在还有人敢这么做吗？

那么你可能会问，本书的作者是如何做到的呢？事实上，多年来我从事的是计算机硬件和软件工程工作，而将我的理论兴趣作为一种业余爱好。

另一个说明当前体系是如何运作的例子是朱利安·施温格（Julian Schwinger）的论文的命运，这些论文有可能解释了庞斯和弗莱希曼的冷聚变实验的机制。尽管拥有一个诺贝尔奖，施温格却无法让他的论文

被任何有声誉的物理学期刊接受。他不由愤怒地说道："这些人可能都忘记了物理学是一门实验科学！"（或者类似这个意思的说法。）

最近另一位像与范·瓦伦一样不得不自己创建期刊来发表研究的是意大利发明家安德烈·罗西（Andrea Rossi）。他声称自己发明了一种可实现现在所谓"低能核反应"的实用设备。他于2011年1月在博洛尼亚大学新闻发布会上展示过了这个设备。他声称，这个设备通过将加热的氢气注入镍粉中，从而获得铜和热量。与庞斯和弗莱希曼的原始装置不同，这个设备似乎更低廉，并且非常实用、可靠和安全。罗西表示，他预计在2011年晚些时候向市场投放其商业化型号。如果这真的实现了，那吃这一拳，工厂化的科学；吃这一拳，专家评审和研究资助制度！正如理查德·费曼所说的，大自然的想象力远超过我们的。

创新的精神永存，工厂化的科学不会取得胜利，原因很简单。抑制创造性的社会暂时获得了更高的稳定性，提高了效率，但它们没有足够的灵活性来应对不断变化的环境。最终它们将败下阵来，就像恐龙被更智能、更灵活的哺乳动物所替代。人类其实在任何一件具体事情上都并不是特别专长，但我们有很强的好奇心，有极强的适应性。像通用图灵机一样，我们是通才，而不是专才。

为了生存，一个社会需要实施某种程度的强制，但不宜过多，以免让自身失去创造性。这是一个微妙的平衡，要允许一些人在一定程度上打破规则。现如今，在某些创造性被巨大的官僚机构微观管理的社会中，我们显然是走向了一个错误的方向。

在我看来，我们今天最紧迫的任务就是，要有足够的创造性去设计一个灵活的社会。在这个社会中，创造性能得到某种程度的容忍，而不是像在赫胥黎《美丽新世界》中的那样，为了稳定，艺术和智慧都被弃之如敝屣。

我们必须要有足够的创造性去设计一个允许创造性的社会！

对此的部分观点可能源于我的犹太文化传统。《塔木德》包含了大量的讨论和论证，并且拉比作为犹太社区领导者的权威只是源自他的知识和智慧，而不是源自世袭权威。每个男子都应该学习，每个人都应该有自己的观点。正如在印度教文化中，没有中央权威，每位大师都有他自己的教义，甚至有他自己关于根本真理的认识……

因此在我看来，沿袭了犹太文化传统的以色列是一个相当具有创造性、允许自由辩论的社会。当然，部分原因是由于其持续处于战争状态，不得不保持创新性。退伍军人（有的是来自情报机关）常常在离开军队后，便去创立高科技公司。而人们也愿意在创业企业中工作……

最后让我引用G. H. 哈代的《一个数学家的辩白》（1940）中的一些话来结束这一章，这本书启发了许多像我这样的数学专业的学生。

> 表达一个多数人的观点绝不值得一个卓绝之人来做，因为根据定义，有多得很的人可以做这件事。
>
> 一个数学家，就像一个画家或诗人，是模式的缔造者。如果他的模式比其他东西更持久，那是因为它们是由思想构成的。
>
> 我从未做过任何一件有用的事。

第八章　数学最终能实现什么？元生物学及更多

猪笼草



猪笼草

真让人惊奇，我们现在已经为发展生物学的基本数学理论迈出了第一步。也就是在几年前，我还认为这是不可能的，这是一个疯狂的梦想，至少需要花费三百年时间。但相反，只要一点点的灵感、一些好的想法，事实上证明这只需三年时间。那么元生物学未来可能的发展方向有哪些？其中又有哪些是现在看似遥不可及但最终有可能用数学实现的呢？

数学自身也在进化，数学完全是有机的。我不是在谈论牛顿式数学最终可能实现什么，也不是在讨论现代的希尔伯特形式化公理体系最终可能实现什么（参见：Jeremy Gray, *Plato's Ghost: The Modernist Transformation of Mathematics* , Princeton University Press, 2008），甚至也不是在讨论我们目前的后现代数学最终可能实现什么。每当数学面对新的挑战时，它自身都会发生转变。库恩的范式转变不仅限于实验科学，它们也出现在数学，一种思维的必要工具且通常被认为是先验学科当中。

并且正如马克斯·普朗克所说的，每有一个老人死亡，科学就进步一点。更确切地说，他说，新的科学思想永远不会被它们的对手所接受。所以相反，实际情况是，新一代人接受了新思想，并将它们视为是理所当然的。这是普朗克在其科学自传里的原话："一个新的科学真理取得胜利，并不是因为它的对手被说服了，由此恍然大悟，而是因为它的对手最终死亡，而熟悉它的新一代人成长了起来。"（转引自：Thomas Kuhn, *The Structure of Scientific Revolutions* .）

所以数学是不断变化的。什么算是有效的证明也是不断变化的。现在甚至还出现了基于计算证据而非证明的经验数学（Jonathan Borwein and Keith Devlin, *The Computer as Crucible: An Introduction to Experimental Mathematics* , A K Peters, 2008），借用理查德·费曼的说法，它大概可以被描述为巴比伦式的，而不是希腊式的（Richard Feynman, *The Character of Physical Law* , MIT Press, 1965）。

所以未来的数学可能变得面目全非。那元生物学又会怎样呢？下面让我们来讨论一下元生物学的未来以及可能的研究课题和项目。

我们已经有了一个生命的定义（梅纳德·史密斯，1986），同时也有了一个证明某种满足该定义的东西存在的数学证明（2010）。这很优雅，但似乎与传统的生物学相去甚远。我们可以做得更好吗？

一种可能是进行计算机实验而非定理证明：实验元生物学，在集群上运行计算机实验。这个实验的进路要想实际可行，我们必须限制程序的运行时间，这样我们就不需要oracle。

我们也可以尝试使用非通用编程语言来编写我们的软件有机体，这种有限制的编程语言不会产生停机问题。

又或者我们可以尝试使用更具生物学味道的计算机编程语言，例如支持并行模式匹配的编程语言。还有，我们也可以研究借鉴自生物学的突变，比如复制一个子程序，这正是生物学中基因所做的。一旦你已经复制了一个重要基因，那么其中一个副本中发生突变也没有妨碍，重要的东西不会丢失。

此外，如果给我们的随机漫步模型加入种群和性，结果会如何？将这些因素综合进我们现有的形式化理论中的最佳方式又是什么？

现在让我们回到理论元生物学，也就是说，证明定理。当前版本的元生物学是基于可计算性理论，基于可计算和不可计算之间的区分。oracle提供了不可计算的“神谕”，从而使我们的数学有机体得以进化，自我改进，变得更聪明。我希望我们也可以使用时间复杂性理论。时间复杂性理论区分的不是什么可计算、什么不可计算，而是什么可快速计算、什么需要多得多的时间计算。

我相信，存在一个折中：元生物学越接近现实，我们能证明的就越少。

因此，回到更现实的元生物学模型的问题，我预期这样的模型将主要是通过实验而不是理论进行探索。下面是一些如何更加现实地收集有关随机进化软件的经验数据的设想：

- 首先，为了加快进化实验，需要避免考虑那些会产生明显错误或明显等价结果的突变。

- 其次，我们可以借鉴软件工程实践的经验。在大型软件项目中，通常会使用诸如面向对象程序设计方法（其遵循封装、抽象等原则），使得虽然代码不断更新，却仍然可维护。这种方法可以避免生成“意大利面条式”代码，并使得修复bug或增强功能所需的改动局限在局部。如果只需在一处作出改动，而不是牵一发而动全身，这显然是件好事。同样，如果代码是通过随机突变而不是人工干预

> 而进行进化的，这无疑也有帮助，因为它增加了随机突变是有用的概率。

类似这样的技术通过提高进化速度应该能使计算机实验更有效率。运气好的话，元生物学将在理论和实验两个方向齐头并进。

下面让我们再谈点别的吧。

> 如果人们不相信数学是简单的，那只是因为他们还没有意识到生命有多么复杂。
>
> ——约翰·冯·诺伊曼

本书是献给冯·诺伊曼的。我在还是一名学生时便深受他的启发，而他的希克森研讨会论文在某种意义上开创了元生物学。在当时，我读了我所能找到的他的所有文献，包括收录在詹姆斯·R. 纽曼的多卷本文选《数学的世界》（1956）的两篇精彩论文的片段。我从冯·诺伊曼那里知道，是图灵的1936年论文创建了计算机硬件和软件，至少作为一个数学概念。

我也从冯·诺伊曼那了解到，数学可以无处不在，数学适用于一切：博弈论、自动机理论、量子力学在希尔伯特空间的形式化……在当时的我看来，冯·诺伊曼每天赶在早餐之前就可以开辟数学的一个新领域。他让一切看起来如此轻而易举。

在很多年里，冯·诺伊曼和摩根斯坦的巨著《博弈论与经济行为》（1944）经常伴随我左右。在这本精彩之作中，冯·诺伊曼把他的整个思想轨迹娓娓道来，向我们展示了如何开辟一个新领域。

博弈论甚至可以被看做一个关于伦理学和道德的数学理论，或至少它为此指明了方向。这一点在很多年前我便意识到了，尽管我从未从事过这方面的研究。这也正是马丁·诺瓦克最近的一本书《超级合作者》提出的主要观点。那么为什么不能有关于美、思维、意识、心理学、人类学（可能的社会安排、可能的社会结构等）或历史动力学［回想一下艾萨克·阿西莫夫的《基地三部曲》（1951—1953）］的数学理论呢？于是我在十几岁的时候，就开始创建一个关于随机性的数学理论，把随机性看做无结构，看做不可压缩性。

其近因，或者说灵感火花，是源于阅读冯·诺伊曼和摩根斯坦的一段注释。其中它阐述这样一个事实，即为了形成一个关于零和博弈的没有鞍点的数学理论，量子力学随机性是必需的。这样一个理论竟然在一个经典的、确定性的世界里是不可能的，这在我看来似乎很奇怪。所以我开始发展之前有过的一个关于定义没有任何结构的二进制序列的想法。我推测，这样的序列在类似硬币配对这样的零和博弈中一定有效，虽然它们不是由一个量子力学系统所产生的……

最近在arxiv.org上的一篇文章表明，自己是自己元素的集合、具有反身关系的集合（x，其中$x \in x$）、非良基集合，它们可能与意识的自我指涉有关。我怀疑这种想法不够深入，不够革命性，但它可能有所作为。可参见：Willard Miranker and Gregg Zuckerman, “Mathematical Foundations of Consciousness” (http://arxiv.org/pdf/0810.4339). 也可参见一篇精彩的书评：Martin Gardner, “Do Loops Explain Consciousness?” *AMS Notices* 54 (2007), pp. 852–854.

此外，一个非常简单的、被反复提及的博弈，囚徒困境，已经被广泛用于对合作行为的进化研究。很多人都对此进行了研究：阿纳托尔·拉波波特（Anatol Rapoport）、罗伯特·阿克塞尔罗德（Robert Axelrod）、卡尔·西格蒙德（Karl Sigmund）、马丁·诺瓦克，等等。这个博弈具有如下收益矩阵：

(*A* 的收益, *B* 的收益)	囚徒 *B* 合作	囚徒 *B* 背叛
囚徒 *A* 合作	(-2, -2)	(-4, -1)
囚徒 *A* 背叛	(-1, -4)	(-3, -3)

收益的单位是监禁的年限（这是个负收益）。*A* 和 *B* 重复玩这个博弈。一个简单的策略是“针锋相对”，模仿你的对手上一局的策略。如果你的对手合作，那么你合作，否则不合作。诺瓦克详细讨论的另一种策略是“赢定输移”，如果你在上一局中成功，重复你先前的选择，否则就改变你之前的选择。更准确地来讲……但也许你应该从诺瓦克和海菲尔德合著的《超级合作者》中获取详细细节。

宇宙不仅奇异得超乎我们想象，而且奇异得超乎我们所能想象。

——霍尔丹

［正如经常发生的，上述引文是原文的简化版：“我毫不怀疑，在现实中，未来将大大超过任何我所能想象的。现在我不禁怀疑，宇宙不仅奇异得超乎我们想象，而且奇异得超乎我们所能想象。”（J. B. S. Haldane, *Possible Worlds and Other Papers* , Chatto & Windus, 1927, p. 286.）］

科学和数学的最终前途会如何？这里请允许我提出我所谓的扩展哥白尼原理：地球不是宇宙的中心，我们在空间上并不具有独特的地位，因此，我们也不会在时间上具有独特的位置。我看不出有什么理由表明我们目前的科学已经接近终极，也没有理由表明我们目前的科学本体论将永存。或许，借用沃尔夫冈·泡利的话来讲，它甚至都称不上是错的。

相较于假定我们现在的科学实质上已经是终极的，我更倾向于使用线性外推法：一个世纪前，没有电子；五十年前，没有计算机；谁知道我们在五十年或一百年后又会了解到什么呢？距今四百年前，牛顿还没有出生，而距今四百年后，现代科学将比今天的科学成熟一倍。也许到那时，它将包含“电子心理学”，这是A. E. 范·沃格特（A. E. Van Vogt）在一篇可爱的科幻故事里编造的一个有趣说法，我记得在小时候读过。

我认为，科学与魔法之间并没有那么不同，它们都相信在日常生活表象背后隐藏着一个隐秘的现实。无论如何，正如阿瑟·克拉克所说的，任何足够先进的技术看上去都与魔法无异。

此外，在我看来，量子力学和量子信息论不是唯物主义的，它们已经是一次彻底的范式转变：世界是思想，是信息，而不是物质。我们不需要等待太久，一个全新的本体论就会出现；事实上，它已经发生了。

最后，让我用卡尔·波普尔在《科学发现的逻辑》开头所引的精彩引文作为全书的结束：

> 理论是网：只有那些撒下网的人才可能有所收获。
>
> ——诺瓦利斯

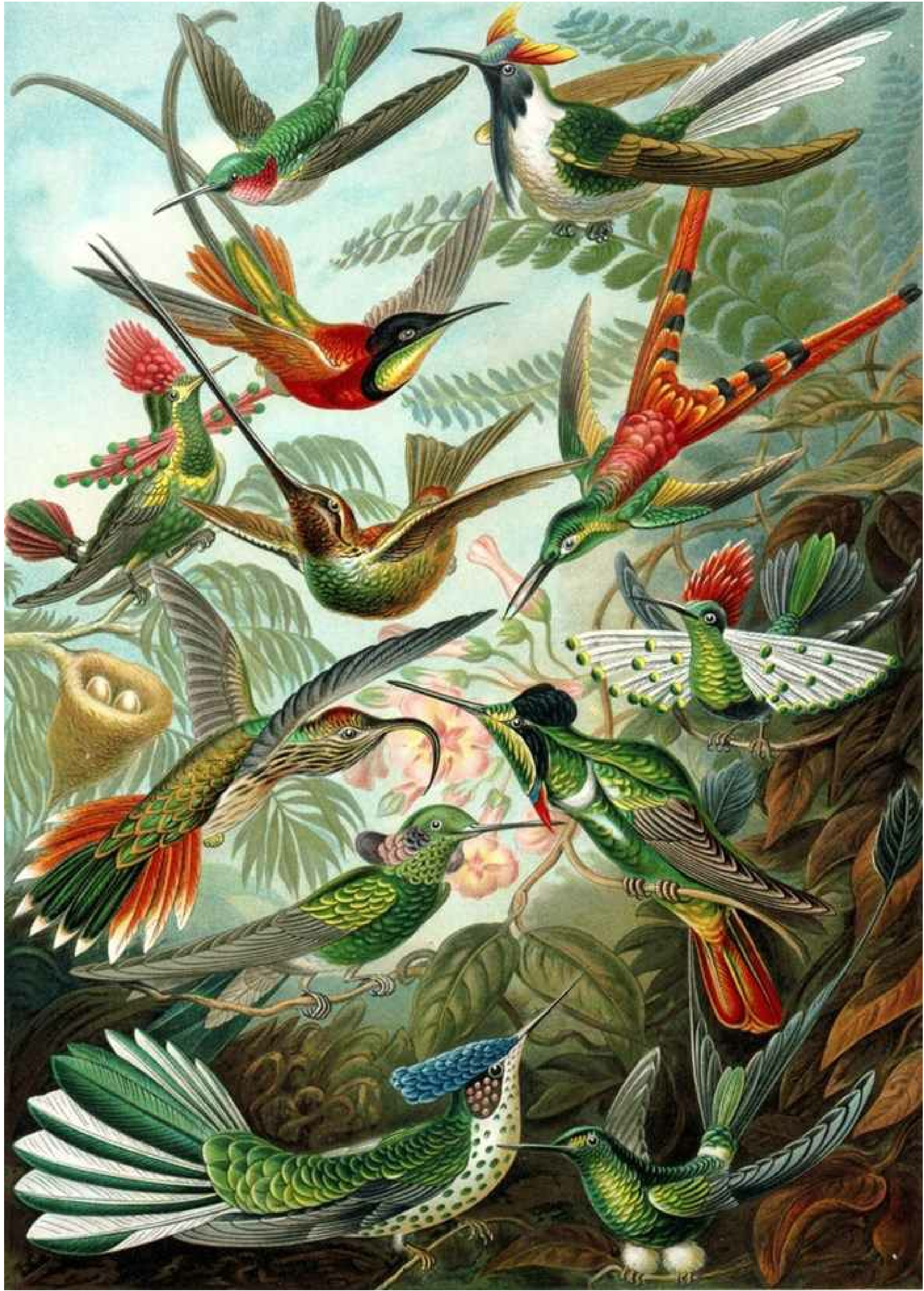
本书介绍的这个“不断突变的软件的进化”模型的细节其实并不重要。我曾听一个生物学家说过，薛定谔的《生命是什么？》里的所有细节都是错误的。然而，《生命是什么？》提出了问题，向许多人预示了建立分子生物学的时机已经成熟。这大概就是本书最好的命运。即使本书中的几乎所有东西都错了，我仍希望它将激励大家从事关于进化和生物创造

性的数学理论的研究。现在创建这样一种理论的时机已经成熟。

附录一　冯·诺伊曼的“DNA=软件”论文 *

* 节选自：John von Neumann, “The General and Logical Theory of Automata,” in Lloyd Jeffress, *Cerebral Mechanisms in Behavior: The Hixon Symposium* , John Wiley and Sons, 1951, pp. 1–41.

蜂鸟



蜂鸟

复杂性的概念；自我复制

复杂性的概念

先前的讨论表明，高复杂性（complexity）在任何与自动机相关的理论中都扮演着重要角色，并且这个概念，尽管初看上去只与量有关，但实际上可能代表的是某种质的东西，事关某种原则问题。在接下来的讨论中，我会考虑这个概念的一个较罕见的意涵，它将使其事关质的一面表露得更为明显。

自然界中存在一个很明显的类似“循环论证”的特性，其最简单的表现形式是这么一个事实：非常复杂的有机体能够自我复制。

对于“复杂性”（complication）这个概念，我们都还很模糊。这个概念及其设想的属性一直以来从未被明确阐述过。然而，我们总是忍不住会认为它们是按照这种方式工作的。当自动机执行某些操作时，这些操作的复杂程度被认为一定会比自动机本身的要低。特别是，如果一个自动机能够构造另一个自动机，那么从父到子的构造过程一定伴随着复杂程度的降低。也就是说，如果 A 能产生 B，那么 A 在某种程度上必须包含 B 的一个完整描述。此外，为了使其生效，在 A 中还必定存在各种安排，以确保这个完整描述得到了阐释，以及要求执行的构造操作得到了实施。在这个意义上，这似乎必定预示着某种程度的退化倾向，在一台自动机制造另一台自动机时，某种复杂性的降低。

尽管这在逻辑上听起来非常合理，但它与自然界中所发生的事情是明显相悖的。有机体能够自我复制，也就是说，它们产生了新的有机体，但复杂性并没有降低。此外，在进化的多个漫长时期，其中的复杂性甚至是在不断增加的。有机体从具有较低复杂性的有机体间接地衍生而来。

因此，在逻辑合理性与现实证据之间存在明显的冲突。有鉴于此，看看这其中是否存在什么可以加以严谨讨论的东西，似乎非常值得一做。

到目前为止，我的阐述一直相当模糊和混乱，而且这不是无意为之。在我看来，不这样的话，我就无法对现有的情形给出一个较好的大致描述。下面我将试着说得更具体明确一些。

图灵的计算自动机理论

英国逻辑学家图灵大约在十二年前曾尝试解决下述问题。

他想给出计算自动机的一个一般性定义。其正式定义大略如下：

自动机是一个“黑箱”，具体细节没有给出，但它具有以下属性。它拥有有限数量的状态，这些状态通过这种方式便可表述：表明状态的总数，比方说 n ，然后依次枚举它们，$1, 2, \ldots, n$ 。自动机的核心操作特性包括描述如何使其发生状态的改变，即从一个状态 i 进入另一个状态 j 。这种状态改变需要与外部世界发生某种交互。对于机器而言，令整个外部世界由一条长纸带构成。令这条纸带宽，比如说1英寸，并令它分成一个个长1英寸的方格。在纸带的每个方格上，可以做或不做一个记号，比方说一个点，并假定这样一个点能够被擦除或者记上。标记有点的方格被称为1，无标记的方格被称为0。（我们可以使用更多的记号，但图灵表明，这无关紧要，不会给讨论的普遍性带来什么实质性帮助。）在描述纸带相对于自动机的位置时，假定纸带总有一个方格可被自动机直接阅读，并且自动机能够向前或向后移动纸带，比方说一次移动一个方格。具体而言，令自动机处于状态i （$=1, 2, \ldots, n$ ），并在纸带上读到一个e （$=0, 1$）。然后，它会转为状态j （$=1, 2, \ldots, n$ ），移动纸带 p 个方格（$p =0, +1, -1$；$+1$表示向前移动一格，-1表示向后移动一格），并对所读到的新方格进行标记f （$=0, 1$；0表示擦除，1表示在此处标记一个点）。将 j 、p 、f 表示为 i 、e 的函数，这就描述了这样一个自动机功能的完整定义。

图灵认真分析了这种自动机能执行什么样的数学过程。借此，他证明了逻辑学中经典的“判定性问题”的多个定理，但我不会在这里涉及这些主题。然而，他引入和分析的“通用自动机”概念，却与我们现在的讨论相关。

一个由数字e （$= 0, 1$）构成的无穷序列其实是数学的基本实体之一。将其视为一种二进制展开，它实质上等价于实数。因此，图灵将这些序列作为他思考的基础。

他研究了什么样的自动机能够构造出什么样的序列的问题。也就是说，给定构造这样一个序列的一个确定规律，他考虑的是，什么样的自动机能被用来根据这个规律构造出该序列。“构造”一个序列的过程可以作如下表述。说一部自动机能够“构造”一个特定序列，是指如果能够通过恰当标记纸带的一段有限长部分，使得当这条纸带被送到该自动机上时，该自动机会在纸带的剩余（无限长）部分中写出该序列。当然，写出这

个无限序列的过程是一个不确定的持续过程。这意味着，自动机将不确定地持续运行，并在给定一个充分长的时间内，写出该（无限）序列中任何所期望的（但当然是有限的）部分。而那个有限长的、做过预先标记的纸带部分便成了自动机处理这个问题的“指令”。

如果任何能由自动机产生的序列也能由某台自动机产生，那么称该自动机为“通用的”。当然，对于不同问题，它通常需要不同的指令。

图灵理论的主要结论

我们可能会想当然地以为，这是不可能的。怎么能有一台自动机，它与任何想象得出来的自动机都至少同样有效，甚至比如一台两倍于其大小和复杂性的自动机？

然而，图灵证明这是可能的。尽管他的证明相当复杂，但其中的基本原理却非常简单。图灵注意到，对于任何想象得出来的自动机，其完整的一般性描述（见先前所述的一般性定义）可以用有限的字词给出。这个描述中会包含某些空白段落——也就是先前提到的函数（用 i 、e 表示的 j 、p 、f ），它们具体说明了自动机的实际功能。当这些空白段落被填充完整后，我们就得到了一台特定功能的自动机。而只要它们还是空白的，那么这个描述表示的就是通用自动机的一般性定义。现在，我们就有可能描述出这样一台自动机，它能够读取这样一个定义。也就是说，当给它输入定义一台特定功能自动机的函数时，它就会像那台被描述的自动机一般运作。这种能力并没有什么神秘之处，它与阅读字典和语法书并遵循字词组合的原则和用法的能力一般无二。所构造的这台自动机能够读取一个描述，并模拟所描述的对象，它就是图灵所说的通用自动机。要想让它复制任何自动机的任何操作，只需给它装备上对该自动机的描述以及该设备执行该操作所需的指令。

扩展图灵理论以处理能产生自动机的自动机

对于我这里关心的自动机“自我复制”问题，图灵提出的过程只在一个方面上太过狭隘了。他的自动机是纯粹的计算机器，其输出是上面标记有0和1的一条纸带。而我这里讨论所需的是其输出是另一台自动机的一台自动机。不过，将这一概念做一个延伸，并从中推导得出与图灵的结果相当的结论在原则上并不困难。

基本定义

正像在前面的例子中一样，首要的工作是对所讨论的自动机给出一个严格定义。首先，我们必须列出构造该自动机所需的基础部件的完整清单。此清单不仅要包含全部的基础部件，还要给出各部件的完整操作定义。给出这样一个清单是相对容易的，也就是说，列出一份“机器部件”的目录，它既要有充分的包罗性，使得可以构造所需的各式机械装置，又要有必要的严谨性，以便可以进行此类讨论。该清单也不一定要很长。当然，它可以变得任意长，也可以变得任意短。只要把那些功能中可通过组合其他部件实现的也作为基础部件包含进去，清单就可以变长。它也可以变短——事实上，通过赋予每个基础部件多重属性和功能，它可以短到只包含一个单元。因此，任何对所需基础部件的数目的陈述都是一个基于常识的妥协，最好是任意一个基础部件的功能都不会太过复杂，也不会有基础部件被要求实现多个显然不同的功能。在这个意义上，可以证明大约十几个基础部件就足够了。其次，自我复制问题可以表述如下：我们能否从这些基础部件中构造出这样一台自动机，如果把该自动机放到一个漂浮着所有这些基础部件的大量副本的池中，它将开始构造其他自动机，并且构造出的这些自动机与它一模一样？这是可行的，而它所依据的原理与前面介绍的图灵所用的原理密切相关。

自我复制定理的推导概要

首先，可以给出一个关于我们所讨论的自动机的完整描述。这个描述应被看做一种一般性描述，也就是说，它包含空白段落。这些空白段落必须被用以描述一台自动机的实际结构的函数所填充。和之前的一样，这些空白被填充与未被填充的区别也正是关于一台特定功能自动机的具体描述与关于一台通用自动机的一般性描述之间的区别。而描述下列自动机在原则上是没有困难的。

(a) 自动机 A ，在读取了关于任意其他自动机的描述（以相关函数的方式）后，它将构造出对应的实体。这时的描述，不像在图灵的例子里那样，不会以带标记的纸带的形式给出，因为我们通常不会选择纸带作为自动机的结构元素。然而，这些结构元素的组合方式并不难描述，因为它们有着带方格的纸带进行标记时的类似特性——要么被用到，要么不被用到。这样的描述被称为指令，并以字母 I 来表示。

“构造”过程与之前的作同样理解。进行构造的自动机被放置在一个漂浮

着所有基础部件的大量副本的池中，并在其中进行构造。我们不必担心这种已经定型的自动机如何能构造出比它更大、更复杂的自动机。在这里，构造更大、更复杂的自动机只不过表现为需要装配更长的指令I 。如前所述，这些指令是基础部件的组合方式。所以显然，指令的大小和复杂性是由将要构造的对象的大小和复杂性决定的。

再接下来，所有由自动机 A 构造出来的自动机都将具有与 A 相同的属性。它们都会有一个存放指令 I 的地方，也就是说，在此处可以插入该指令。而当这样的自动机被描述出来时（例如，以相应的指令的方式），对于在何处插入指令 I 的具体规定其实已经蕴涵在这个描述当中了。所以我们可能会直接说，“插入一个给定的指令 I 到一个给定的自动机中”，而不作更多解释。

(b) 自动机 B ，它可以为装配给自己的任何指令 I 做一个副本。这里的 I 是(a)中所说的基础部件的组合方式，用来替代纸带。当 I 要装配另一台自动机时，自动机 B 就会被用到。换句话说，该自动机是一台“穿孔纸带复制机”——能够读取穿孔纸带，并制造出与此相同的第二条穿孔纸带的机器。请注意，该自动机也可以生成比自己更大、更复杂的对象。请再次注意，这没有什么好惊讶的，因为它只是复制，需要具有与输出一模一样大小和复杂性的一个对象作为输入。

经过这些准备工作，我们就可以进入到决定性的一步。

(c) 将自动机 A 和 B 相结合，并配上控制机制 C 。C 执行如下步骤。首先为 A 装配指令 I ［还是在(a)和(b)所提到的意义下］，这样 C 将使 A 构造由指令 I 描述的自动机。接下来，C 使 B 复制上面提到的指令 I ，并将这个副本插入上面提到的由 A 刚刚构造的自动机中。最后，C 将这个最终产物从系统 $A+B+C$ 中分离出来，“放手”让它成为一个独立的实体。

(d) 使用 D 来表示整个系统 $A+B+C$ 。

(e) 为了能够运行，$D=A+B+C$ 必须装配一个前述的指令 I 。如前所述，该指令必须被插入 A 里面。现在这个指令I_D （因为它描述了自动机D ），会被插入 D 当中的 A 里面。不妨将现在形成的这个聚合物称为 E 。

E 显然是能自我复制的。请注意，其中不涉及循环论证。决定性的一步

出现在 E ，这时描述 D 的指令 I_D 被构造出来并装配给 D 。当需要构造 I_D 时，D 已经存在，并且它不会因 I_D 的构造而发生改变。I_D 的构造只是为了形成 E 。因此，D 和 I_D 之间有着确定的时间和逻辑顺序，整个过程遵循逻辑规则，是没有问题的。

该结论的阐释及初步扩展

对这个自动机 E 的描述有一些吸引人的地方，但这次我不会展开长篇讨论。举例来说，很明显，指令 I_D 大致上起着基因的功能。同样明显的是，复制机制 B 执行的是复制基因物质的基本活动，而这个基本操作显然也见于活细胞的繁殖。也很容易看出，对系统 E ，尤其是 I_D 的任意改变，会产生类似于突变的效果：通常是致命的，但也有可能在发生性状改变的同时继续繁衍。当然，同样明显的是，这个类比必然有其限度。自然的基因很可能不会包含对于它所要构造的对象的一个完整描述。它很可能只会包含一般性的指针、一般性的提示。而在我们的前述讨论中，这种简化是不存在的。但显然，这种简化及其他类似的机制，具有十分重要的、质的意义。如果我们不尝试去理解透彻这样的简化原则，我们就远远无法真正理解自然过程。

对上述方案稍作调整，我们就可以构造出既能自我复制，又能构造出其他自动机的自动机。［这种自动机的功能更接近于基因的一个（如果不是全部的话）典型功能，自我复制并制造（或催动制造）某些特定的酶］。事实上，只需将指令 I_D 用指令 I_{D+F} 替换，这个指令既描述了自动机 D ，也给出另一个自动机 F 的描述。将 I_{D+F} 插入 D 当中的 A 里面，并将所生成的聚合物用 E_F 指代。EF 显然具有上述属性。它会自我复制，同时还会构造 F 。

请注意，EF 的一个“突变”，只要它是发生在指令 I_{D+F} 中的 F 部分，那它就不是致命的。如果用 F' 替换 F ，使得 E_F 变成 $E_{F'}$ ，这时“突变体”仍然可以自我复制，只是其副产品发生了改变，是 F' 而不是 F 。这当然是典型的非致死性突变。

所有这些只是向一个关于自动机的系统理论迈出的非常初步的尝试。此外，它们也只是代表一个特定的方向。正如我先前所说的，这个方向试图对“复杂性”形成一个严谨的概念。我们的讨论表明，“复杂性”在其低层次是会退化的，也就是说，一台自动机只能产生比它复杂性更低的另

一台自动机。然而，存在某个最低层次，在那里，这种退化特性不再是普遍的，自动机可以自我复制，甚至可能构造出复杂性更高的实体。复杂性以及组织，在低于某个最低层次时会退化，而在高于该层次时则可以自我维持，甚至增加，这一事实显然将会在未来任何与该主题相关的理论中扮演重要角色。

附录二　证明的核心

青蛙



青蛙

第五章勾勒出了达尔文进化论在我们的玩具模型中有效的证明，但其中省略了一些重要细节，毕竟对于大多数人而言，了解证明的大致想法就够了。而对于那些想要知道更多的人，这里将给出省略的那些重要细节。虽然这仍是证明的概要，但已经足够详细，能让任何对算法信息论有深入了解的人顺利完成证明。

这就是所谓“通过连续逼近来给出一个证明”。在我看来，这比把全部细节一股脑抛出要更好，而且这也更接近人们在做数学研究时发现证明的方式。

停机概率Ω定义如下。每一个停机的 K 比特长度的程序都为停机概率贡献了 $1/2^K$：

$$\Omega=\Sigma_{\text{停机的程序}P}\, 2^{-\text{（程序 }P\text{ 的比特长度）}}$$

为了使总和不会发散到无穷，而是收敛到1，要求程序 P 是“自定界”的（self-delimiting），也就是说，有效程序 P 的任何扩展都不是一个有效程序。

接下来我们将 Ω_K 定义为定义Ω的总和的一部分，只包括那些在时间 K 内停机的长度小于等于 K 比特的程序：

$$\Omega_K=\Sigma_{\text{程序 }P\text{ 的长度}\leq K\text{，且在}\leq K\text{ 的时间内停机}}\, 2^{-\text{（程序 }P\text{ 的比特长度）}}$$

Ω_K 是 K 的一个可计算函数，它（很慢地）收敛到Ω。此外，

$$\Omega_K \leq \Omega_{K+1}$$

也就是说，Ω_K 是 K 的“单调递增”（即非递减）函数。

请注意，知道了一个非常大的整数，就等价于知道了Ω的一个很好的下界：

1. 如果给我们一个非常大的整数 N，我们可以找到Ω的一个很好的下界，即 Ω_N。

2. 相反，给定一个数 β，$0<\beta<\Omega$，并且它可以表示成有限的二进分数

（分母是2的乘方的分数），我们可以将 β 转化为一个非常大的整数 N，即找到第一个 N，使得$\Omega_N \geq \beta$。如果 $\beta > \Omega$，这个过程将永远不会停止。（β 不可能等于Ω，因为Ω可以证明是无理数。）

这样（尽管省略了细节），我们可以看到，知道了非常大的整数BB(N)多少就等价于知道了Ω的 N 位。

预备知识到此为止。

证明的核心在于考虑突变M_K。它会事实上获得Ω的一个下界，并会尝试通过增加$1/2^K$来对其加以改进，即使其更接近Ω，但又不超过Ω。

让我们用φ_A表示任意一个有机体/程序 A 的适应性，即 A 在停机之前算得的正整数。下面就开始完整解释 M_K 是如何工作的。

突变 M_K，如果它被赋予适应性为 φ_A 的有机体 A，那么它首先会运行程序 A 来计算其适应性 φ_A，然后会利用这一非常大的整数来计算Ω的一个下界Ω_{φ_A}。接着 M_K 会增加$1/2^K$到Ω的这个下界，得到

$$\beta = \Omega_{\varphi_A} + 1/2^K$$

它可能小于Ω，也可能超过Ω。但不论何种情况，突变M_K 都将程序 A 转化成了突变程序

$$A' = \text{（用前缀}\pi\text{拼接}\beta\text{）} = \pi\beta$$

通过找到第一个N，使得

$$\Omega_N \geq \beta$$

这个自定界的前缀π将 β 转化成了一个非常大的整数。然后π输出这个整数 N，并停机。

那么为什么这些突变 M_K 这么有用？

首先，请注意，如果 β 小于Ω，则 A' 的适应性将大于 A 的适应性。另一

方面，如果 β 已经超过Ω，则突变有机体 A' 将不会停机。

这些突变 M_K 可以被用来快速收敛到Ω的正确值。对于程序 $A=\pi\beta$，如果我们从 $\beta=0$开始，然后依次尝试 M_K 突变（$K=1, 2, 3, \ldots$），我们将在每个阶段（每次突变）获得Ω的一个新的比特。如果 M_K 成功，那么Ω的第 K 位是1；而如果 M_K 失败，那么Ω的第 K 位是0。

因此，在尝试M_K（$K=1, 2, 3, \ldots, N$）后，程序 $A=\pi\beta$ 中的 β 会有Ω的 N 位正确值。此外，在尝试 N 次突变后，程序 $A=\pi\beta$ 的适应性将接近于BB(N)，并且增长非常快。事实上不难看出，这基本上是尝试 N 次突变所能获得的最佳结果。

这就是我们所谓的“智能设计”，因为我们可以选择要尝试的突变，并可以以最佳顺序来操作……

然而，如果随机挑选突变会发生什么呢？每一个可能的突变会被无限次尝试，包括每一个可能的 K 的突变 M_K。存在其他突变也无所谓，只要我们依次尝试 M_K（$K=1, 2, 3, \ldots, N$），适应性也会跟上面一样将达到BB(N)。正如我们在第五章所说的，当我们尝试过N^2至N^3次随机突变时，这个结果将会出现，证毕。

参考文献

Maurício Abdalla, *La crisis latente del darwinismo* , Cauac Editorial Nativa, 2010.

David Berlinski, *Black Mischief: The Mechanics of Modern Science* , William Morrow, 1986.

David Berlinski, *The Devil's Delusion: Atheism and Its Scientific Pretensions* , Crown Forum, 2008.

Sydney Brenner, *My Life in Science* , Biomed Central Ltd., 2001.

William Byers, *The Blind Spot: Science and the Crisis of Uncertainty* , Princeton University Press, 2011.

Gregory Chaitin, “Randomness in Arithmetic and the Decline and Fall of Reductionism in Pure Mathematics,” in John Cornwell, *Nature's Imagination: The Frontiers of Scientific Vision* , Oxford University Press, 1995, pp. 27–44.

Gregory Chaitin, *Meta Math！ The Quest for Omega* , Pantheon, 2005.

Gregory Chaitin, *Thinking about Gödel and Turing: Essays on Complexity, 1970–2007* , World Scientific, 2007.

Gregory Chaitin, *Matemáticas, Complejidad y Filosofía / Mathematics, Complexity and Philosophy* , Midas, 2011 (bilingual Spanish/English edition).

Gregory Chaitin, Newton da Costa and Francisco Antonio Doria, *Gödel's Way: Exploits into an Undecidable World* , CRC Press, 2012.

Martin Davis, *The Undecidable: Basic Papers on Undecidable Propositions, Unsolvable Problems and Computable Functions* , Dover, 2004.

Richard Dawkins, *The Ancestor's Tale: A Pilgrimage to the Dawn of Evolution* , Houghton Mifflin, 2004.

James Gleick, *The Information: a History, a Theory, a Flood* , Pantheon, 2011.

Ernst Haeckel, *Art Forms from the Ocean* , Prestel, 2009.

Ernst Haeckel, *Art Forms in Nature* , Prestel, 2010.

Fred Hoyle, *The Intelligent Universe: A New View of Creation and Evolution* , Michael Joseph, 1983.

John Kemeny, "Man Viewed as a Machine," *Scientific American* 192 (April 1955), pp. 58–67.

Julien Offray de La Mettrie, *Man a Machine* , Open Court, 1912.

Stephen C. Meyer, *Signature in the Cell: DNA and the Evidence for Intelligent Design* , HarperOne, 2009.

Edward F. Moore, "Artificial Living Plants," *Scientific American* 195 (October 1956), pp. 118–126.

Matt Ridley, *The Red Queen: Sex and the Evolution of Human Nature* , Harper Perennial, 2003.

Matt Ridley, *Francis Crick: Discoverer of the Genetic Code* , Eminent Lives, 2006.

Máximo Sandín, *Lamarck y los mensajeros: la función de los virus en la evolución* , Ediciones Istmo, 1995.

Máximo Sandín, *Pensando la evolución, pensando la vida: la biología más allá del darwinismo* , Cauac Editorial Nativa, 2010.

Arturo Sangalli, *Pythagoras' Revenge: A Mathematical Mystery* , Princeton University Press, 2009.

James A. Shapiro, *Evolution: A View from the 21st Century* , FT Press, 2011.

Neil Shubin, *Your Inner Fish: A Journey into the 3.5-Billion-Year History of the Human Body* , Pantheon, 2008.

John Maynard Smith, *The Problems of Biology* , Oxford University Press, 1986.

John Maynard Smith, *Shaping Life: Genes, Embryos and Evolution* , Weidenfeld & Nicolson, 1998.

John Maynard Smith and Eörs Szathmáry, *The Origins of Life: From the Birth of Life to the Origin of Language* , Oxford University Press, 1999.

John C. Stillwell, *Roads to Infinity: The Mathematics of Truth and Proof* , A K Peters, 2010.

John von Neumann, “The General and Logical Theory of Automata,” in Lloyd Jeffress, *Cerebral Mechanisms in Behavior: The Hixon Symposium* , John Wiley and Sons, 1951, pp. 1–41. Reprinted in James R. Newman, *The World of Mathematics* , Dover, 2003.

John von Neumann, *Theory of Self-Reproducing Automata* , University of Illinois Press, 1966 (edited and completed by A. W. Burks).

译后记

达尔文在《物种起源》中系统阐述了进化论。他的进化思想在生物学界乃至科学界都得到了公认。然而，对于进化的机制，科学家们一直都在争论不休，除了自然选择学说之外，还出现了像跃变论、直生论、群体遗传学、基因选择学说、社会生物学、间断平衡、分子进化等众多理论。然而，无论是佐证和支持达尔文主义，还是与达尔文针锋相对，它们都没有一个数学理论作为支撑。好像数学这一科学皇后忘了生物学，至今，进化论还缺乏一个数学理论。这是生物学的一个巨大遗憾。

最近，算法信息论的创始人、一位极富开创性的数学家格雷戈里·蔡汀（Gregory Chatin）经过四十余年的研究，撰写了本书。有趣的是，蔡汀为达尔文进化论提出了一个数学理论，并基于此，开创了一个称为“元生物学”的新领域。在书中，蔡汀证明达尔文进化论的主要路径如下：

(1) DNA是一个古老的自然软件。不考虑代谢和身体这些物质因素，生命的本质其实就是不断进化的软件。DNA是具有三四十亿年历史的软件。如果把人看做一台“机器”，那么身体、物质、能量和代谢都是机器的“硬件”部分所关心的，而对于进化，关键在于“软件”。可以说，生物的进化就是软件进化，生命的本质其实就是不断进化的软件。

(2) 从数学模型上来看，用一个程序A 模拟生物体，生物体的突变就是程序的变异（一个或者多个比特的转换），进化的速率通过忙海狸函数进行度量。这就构造了一个完整的生命进化数学模型，这也是元生物学的基础。

(3) 达尔文主义的进化可以被模型为软件空间中的随机漫步问题，它随机尝试所有可能的算法突变。可以证明，这个进化可在N^2 到N^3 之间的时间复杂度下获得最佳适应度。

元生物学与系统生物学、其他生物学，甚至其他传统学科相比，其更关注“创造性”。创造性是生命的本质，而基因并非如理查德·道金斯所谓的那般“自私”，相反，性的驱动力在于整合与创新。创造性不仅证明了达尔文，更捍卫了数学。数学并非静态、不变而“完美”的，事实上，数

学之美在于其创造性。元生物学所展现的自然图景不是机械主义和还原论的，并非一个封闭的希尔伯特式形式系统，相反，通过构造软件，自然世界成为富有创造力和开放的，它的进化永不停止。

应该说，作为新毕达哥拉斯主义者和数字哲学的推崇者，蔡汀崇尚数学的简单之美，创新之美。读者在解读“元生物学”中，可以通过了解蔡汀的Ω数以及他的“元数学”，来厘清元生物学的理论基础，同时亦能对他的理论路径和科学抱负有一个更为全面的了解。正如蔡汀自己所言，或许本书中大多数甚至全部的内容都是错的，但这并不重要，重要的是，读者在阅读完本书后，能够跳出本书的范畴，以更“高阶”的视角去欣赏数学对进化论的一种简洁而优雅的阐释尝试，去欣赏和尊重数学的开放与创新之美。

最后，特别感谢我的老师，刘钢教授，是他带领着我从哲学的角度去审视计算与信息。感谢我的父亲陈寿贤、我的母亲李小琴以及我的妻子李爽，是他们一直在默默地支持我做一大堆“无用”之事。感谢人民邮电出版社的楼伟珊编辑以及许多帮我审阅和校对译稿的工作人员，没有他们的努力和帮助，我想这本译作不会这么快地与读者见面。

陈鹏

2014年**8**月

看完了

如果您对本书内容有疑问，可发邮件至contact@turingbook.com，会有编辑或作译者协助答疑。也可访问图灵社区，参与本书讨论。

如果是有关电子书的建议或问题，请联系专用客服邮箱：ebook@turingbook.com。

在这里可以找到我们：

- 微博 @图灵教育 : 好书、活动每日播报
- 微博 @图灵社区 : 电子书和好文章的消息
- 微博 @图灵新知 : 图灵教育的科普小组
- 微信 图灵访谈 : ituring_interview，讲述码农精彩人生
- 微信 图灵教育 : turingbooks
